

innovations agronomiques

n°106 / Octobre 2025



Structurer et Produire l'Innovation dans les systèmes ayant des Cultures et de l'Élevage

Le Réseau Mixte Technologique SPICEE - Structurer et produire l'innovation dans les systèmes ayant des cultures et de l'élevage ensemble - a été labellisé en 2020 pour une durée de 5 ans. Son enjeu est de dégager des principes génériques de fonctionnement conjoint des productions animales et végétales à l'échelle de la ferme, d'un collectif de ferme et d'un territoire et des modalités de réussite des approches de bouclage des cycles.

Pour cela, les méthodes et outils adaptés à la diversité des formes et contextes d'existence des systèmes culture - élevage sont à produire. L'association culture-élevage est vue comme un levier pour accompagner la transition agroécologique, prendre en compte l'épuisement des ressources non renouvelables dans un contexte de changement climatique et d'aléas économiques croissants.

Ce numéro traite :

- Des performances des systèmes polyculture élevage
- Des systèmes polyculture élevage en Agriculture Biologique
- Des interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire
- Des freins, Leviers et outils pour la mise en œuvre des interactions cultures-élevage

Le RMT implique les partenaires suivants : Idele (porteur du RMT), Acta (co-porteur), INRAE (co-porteur), Itavi, EPL Radingem, Montmorillon, Nevers, Trust'ing, CA Occitanie, Centre, Normandie, Bretagne, Creuse, Saône et Loire, Unicolor, Arvalis, Ifip, Bordeaux Sciences Agro, Craw, Agro-Transfert, UMR Metis, Agrofile, AgroCampus Ouest, ESA, EPL Fontaines, Quetigny, Coop de France, UTT, CIRAD, GIE Elevage Occitanie, AgroParisTech, Inter Afocg, Fermes de Figeac, CIIRPO, UniLaSalle, Itab, Agence de l'Eau Adour-Garonne, VetagroSup.



Innovations Agronomiques

Volume 106 - Octobre 2025

Structurer et Produire l'Innovation dans les systèmes ayant des Cultures et de l'Elevage - Ensemble

Le Réseau Mixte Technologique SPICEE - Structurer et produire l'innovation dans les systèmes ayant des cultures et de l'élevage ensemble - a été labellisé en 2020 pour une durée de 5 ans. Son enjeu est de dégager des principes génériques de fonctionnement conjoint des productions animales et végétales à l'échelle de la ferme, d'un collectif de ferme et d'un territoire et des modalités de réussite des approches de bouclage des cycles. Pour cela, les méthodes et outils adaptés à la diversité des formes et contextes d'existence des systèmes culture - élevage sont à produire. L'association culture-élevage est vue comme un levier pour accompagner la transition agroécologique, prendre en compte l'épuisement des ressources non renouvelables dans un contexte de changement climatique et d'aléas économiques croissants.

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Jean-Philippe Choisis, INRAE ; Marc Moraine, INRAE ; Gilles Martel, INRAE ; Jeanne Pourias, Chambre d'Agriculture Bretagne ; Carla Gava, GIE Occitanie ; Samuel Bruley, Lycée Agricole de Fontaines ; Vincent Thenard, INRAE ; Fabien Stark, INRAE ; Solene Pissonnier, AgroParisTech.

Initiée en 2007, la revue de transfert *Innovations agronomiques* a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.

Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.



Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-1485-6

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1486-3

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol106>

Pour citer ce numéro : Collectif. (2025). *Innovations agronomiques, volume 106, octobre 2025. Structurer et Produire l'Innovation dans les systèmes ayant des Cultures et de l'Elevage - Ensemble* (Version 1). Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. <https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol106>

Photos de couverture : © SPICEE

Licence : CC BY-NC-ND 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Sommaire

Les performances des systèmes polyculture élevage

Thomas PUECH, Amandine DURPOIX, Bénédicte AUTRET, Laurent BRUNET, Damien FOISSY, Sara PARISOT et Pierre GUILLEMIN, 2025 - **Une transition par la diversification d'un système de polyculture-élevage : variabilité des performances techniques et conditions territoriales d'émergence.**

Innovations

Agronomiques

106,

1-13

<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art01>

Les systèmes polyculture élevage en Agriculture Biologique

Fabrice BELINE, Marylou BLONDEL, Sara LARCHER, Niels BIZE, Antoine BOUTIER, Aurélie WILFART, Fanny VERGELY et Souhil HARACHAOUI, 2025 - **Vers l'autonomie azotée en agriculture biologique : une étude de cas théorique sur un territoire français.**



Innovations Agronomiques 106, 14-30
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art02>

Bertrand DAVEAU, 2025 - Evolution et gestion de la fertilité des sols d'un système bovins viande autonome en agriculture biologique.

Innovations Agronomiques 106, 31-41
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art03>

Quentin BELLANGER, Fabrice BELINE, Aurélie WILFART, Fanny VERGELY, George MAILLARD, Yann EVENAT, Niels BIZE et Souhil HARCHAOUI, 2025 - Circularité de l'azote et besoins énergétiques de fermes en agriculture biologique situées en Bretagne : enseignements d'une analyse de terrain.

Innovations Agronomiques 106, 42-53
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art04>

Les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire

Solène PISSONNIER, Myrto PARMANTIER, Julie MENADI et Marine SCHMITT, 2025 - Le projet Feder'Acteurs : choisir des méthodologies chemin-faisant pour diagnostiquer, concevoir et évaluer les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire : l'exemple de l'AOP Chaource.

Innovations Agronomiques 106, 54-67
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art05>

Myrto PARMANTIER, Marc MORAINÉ, Rémy BALLOT et Lorène PROST, 2025 - Co-conception de scénarios de complémentarités culture-élevage pour la réduction des pesticides à l'échelle d'un territoire.

Innovations Agronomiques 106, 68-81
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art06>

Freins, leviers et outils pour la mise en oeuvre des interactions cultures-élevage

Tiago TEIXEIRA DA SILVA SIQUEIRA, Clément JACQUET, Kassi Ange Emmanuel KOUADIO et Jean-Philippe CHOISIS, 2025 - Acteurs, représentations et stratégies dans les transitions par la bioéconomie circulaire du système agri-alimentaire de l'île de La Réunion.

Innovations Agronomiques 106, 82-93
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art07>

Audrey FANCHONE, Damaris STERLING, Jean-Philippe CHOISIS et Jean-Marc MEYNARD, 2025 - Existe-t-il des verrouillages sociotechniques freinant l'intégration culture-élevage ? Un cas d'étude en Guadeloupe.

Innovations Agronomiques 106, 94-105
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art08>

Nicolas DEVILLERS, Sabine CONTE, Stéphanie DURAND, Marie-Noëlle THIVIERGE, Thomas PUECH et Isabelle BREUNE, 2025 - Conception d'un système circulaire de polyculture-élevage agroécologique : la Plateforme agroécologique de Sherbrooke (Québec).

Innovations Agronomiques 106, 106-121
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art09>



Une transition par la diversification d'un système de polyculture-élevage : variabilité des performances techniques et conditions territoriales d'émergence

Thomas PUECH¹, Amandine DURPOIX¹, Bénédicte AUTRET¹, Laurent BRUNET¹, Damien FOISSY¹, Sara PARISOT¹, Pierre GUILLEMIN¹

¹ INRAE, UR ASTER, 88500 Mirecourt, France

Correspondance : thomas.puech@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art01>

Résumé

La transition agroécologique s'inscrit dans un environnement biophysique et socio-économique dont les systèmes agricoles sont dépendants pour la construction de leurs performances biotechniques et la valorisation de leurs productions. L'objectif de cet article est d'étudier la transition d'un système autonome de polyculture-élevage bovin lait vers un système diversifié conduit à INRAE en expérimentation système. Via des analyses multivariées appliquées aux productions animales (vaches laitières) et végétales (fourrages récoltés), les résultats montrent une variabilité marquée des performances techniques en lien avec les choix de conduite et les conditions de milieu. A l'échelle ferme, nous montrons que la diversification permet une meilleure valorisation des ressources du milieu grâce aux interactions cultures-élevage, pour un niveau de productivité équivalent. De plus, nous montrons que la transition par la diversification est conditionnée par la présence sur le territoire d'acteurs des filières engagés et ouverts à la valorisation d'une large diversité de productions.

Mots-clés : Agroécologie, Multi-échelle, Typologie, Filières, Expérimentation Système

Abstract: Transition through diversification of a mixed crop-livestock system: variability of technical performances and local conditions for emergence

Agroecological transition is part of a biophysical and socio-economic environment on which farming systems depend to build their biotechnical performance and add value to their production. The aim of this article is to study the transition from an autonomous dairy-polyculture system to a diversified system conducted at INRAE in system experimentation. Using multivariate analyses applied to animal production (dairy cows) and crop production (harvested forage), the results show marked variability in technical performance, linked to management choices and environmental conditions. At farm level, we show that diversification enables better use to be made of environmental resources, thanks to crop-livestock interactions, for an equivalent level of productivity. In addition, we show that the transition to diversification is conditioned by the presence in the region of committed industry players open to the development of a wide range of products.

Keywords: Agroecology, Multiscale, Typology, Sector, System Experiment

1. Introduction

Les exploitations agricoles et les territoires ruraux de l'Europe de l'Ouest se sont spécialisés depuis la seconde moitié du xx^e siècle. Cette spécialisation s'est faite dans une logique de transfert du modèle industriel à l'agriculture pour augmenter la productivité du secteur agricole (Jepsen *et al.*, 2015) avec (i) une forte intervention des politiques publiques et (ii) une artificialisation croissante des milieux favorisée par un faible prix de l'énergie (et produits dérivés comme les engrais azotés) et le développement de la mécanisation, de l'irrigation, du drainage et de l'usage des pesticides. Ces transformations ont entraîné un recul généralisé des formes de polyculture-élevage en Europe de l'Ouest et particulièrement en



France (Billen *et al.*, 2014 ; Schott *et al.*, 2018) et une dépendance accrue de ces systèmes aux importations de protéines végétales pour l'alimentation des animaux et aux ressources minières pour la fertilisation des productions végétales (engrais). Or, la raréfaction des ressources non renouvelables (Campbell *et al.*, 2017) dont dépendent les systèmes agricoles actuels (Harchaoui et Chatzimpiros, 2019), l'augmentation du coût des intrants et les changements climatiques en cours (et à venir - Lee *et al.*, 2023) questionnent les capacités des systèmes agricoles à s'adapter à ces nouveaux contextes de production.

Dans ce contexte, les systèmes basés sur les principes de l'agroécologie et notamment ceux misant sur les complémentarités entre cultures et élevages représentent une voie à explorer vers plus d'autonomie et de durabilité des systèmes agricoles (Altieri *et al.*, 2012 ; Dumont *et al.*, 2014 ; Gliessman, 2004). Ces complémentarités permettent un bouclage des cycles de nutriments indispensable au maintien de la fertilité des sols sur le long terme de ces systèmes et offrent un certain nombre de services écosystémiques d'autant plus intéressants que les productions animales s'appuient sur des pratiques herbagères, par ailleurs faiblement concurrentielles dans l'usage des sols avec l'alimentation humaine (Benoit *et al.*, 2024 ; Benoit et Mottet, 2023). Ces systèmes combinant cultures et élevages sur des cycles de production contrastés (cycles annuels, pluriannuels, voire productions pérennes) se caractérisent souvent par une saisonnalité marquée des productions, d'autant plus lorsque conduits en agriculture biologique (e.g. systèmes bovin lait - Martin *et al.*, 2024, ovin allaitant - Experton *et al.*, 2018). Dès lors, ils sont généralement plus complexes et sensibles aux variations des conditions de milieu. Les critères de leur analyse doivent se réinventer à l'aune des enjeux de transition associés (Magne *et al.*, 2024) et des partenariats entre acteurs territoriaux qui les sous-tendent (Lasseur *et al.*, 2019) : analyse de trajectoires et développement d'indicateurs sur le temps long, combinaison d'approches à différents niveaux d'organisation (animal/parcelle, troupeau/sole, ferme, territoire) et explicitation des conditions de succès.

Cet article vise à explorer quelques critères d'analyse de ces systèmes agricoles diversifiés, particulièrement au regard des enjeux de transition agroécologique : analyse de trajectoires, combinaison d'échelles, conditions de succès. Il vise d'abord à étudier les performances biotechniques à différents niveaux d'organisation (sole, troupeau, ferme), puis à expliciter les conditions territoriales d'émergence de ces systèmes à partir d'une expérimentation système singulière conduite à INRAE.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Une ferme – deux expérimentations « système » autonomes

Ce travail s'appuie sur l'expérience singulière de l'installation expérimentale (IE) de l'unité de recherche INRAE-ASTER (Mirecourt, Vosges, France) qui expérimente de longue date des systèmes agricoles en transition agroécologique. Ces expérimentations dites « système » sont conduites à l'échelle « ferme entière » selon un mode de conception « pas à pas » (Coquil *et al.*, 2011 ; Meynard *et al.*, 2023). Elles ont pour cadre commun l'enjeu d'autonomie dans le but de « faire au mieux avec les ressources du milieu » (Fiorelli *et al.*, 2018). Ces systèmes sont volontairement contraints (aucun fourrage ou matière fertilisante n'est importée ou exportée de la ferme) et conduits selon le cahier des charges de l'agriculture biologique.

La première expérimentation (2004-2015) est largement orientée vers la production bovin lait (Coquil *et al.*, 2009 ; Fiorelli *et al.*, 2018). Elle associe deux sous-systèmes conduits en parallèle :

Un sous-système de polyculture-élevage misant sur les complémentarités entre cultures et élevages pour lequel les principaux produits sont issus de l'élevage de bovins laitiers (lait, viande) et de vente de céréales meunières (blé, seigle). Il s'appuie sur 55 ha de prairies permanentes, 40-50 ha de prairies temporaires, 30 ha de céréales meunières et autant de cultures annuelles fourragères. Le troupeau est



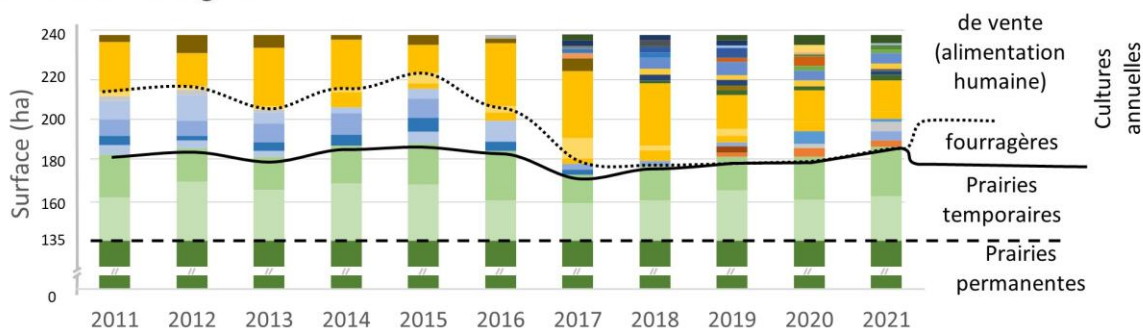
composé de 60 vaches laitières en vêlage groupé d'automne et leur suite (1^{er} vêlage à 3 ans). Les vaches laitières sont complémentées à hauteur d'environ 700 kg de concentrés fermiers par an.

Un sous-système exclusivement herbager où les seuls produits sont issus de l'élevage de bovins laitiers (lait, viande). Ce système s'appuie sur 78 ha de prairies permanentes et 40 vaches laitières (vêlage de printemps, herbivorie stricte) et leur suite (1^{er} vêlage à 3 ans).

La seconde expérimentation a débuté en 2016 (PAPILLE - système de Polyculture polyélevage Autonome, conçu Pas à pas pour l'alimentation humaine, avec Les ressources du miLiEu) et place la question de l'alimentation humaine au cœur du projet agricole. Les productions ont été diversifiées pour favoriser leurs complémentarités pour l'usage des ressources en limitant les concurrences d'usage des sols entre alimentation animale et alimentation humaine (Coquil *et al.*, 2019). Les pratiques d'élevage des bovins se placent dans la continuité des modalités du système herbager (vêlage groupé de printemps, herbivorie stricte), avec toutefois des inflexions majeures dans certaines conduites : croisement de races, monotraite, élevage des génisses sous vaches nourrices pour avancer l'âge au vêlage à 24 mois (Coquil *et al.*, 2017a). Une troupe ovine est introduite et conduite en complémentarité des bovins pour l'accès aux ressources fourragères (plein air intégral, croisement de races, herbivorie stricte). Les cultures annuelles diversifiées (environ 20 espèces différentes) sont à destination exclusive de l'alimentation humaine (Figure 1a). Les productions non commercialisables (issues de tri des cultures, excès de lait colostral...) sont valorisées par des porcs élevés au pâturage (Puech *et al.*, 2021).

Bien que des différences de performances aient été montrées entre les deux sous-systèmes sur la première expérimentation (Coquil *et al.*, 2018b ; Fiorelli *et al.*, 2018), cet article considérera ces deux sous-systèmes comme une ferme entière, en cohérence avec l'expérimentation PAPILLE mise en place depuis 2016.

a. Productions végétales



b. Productions animales

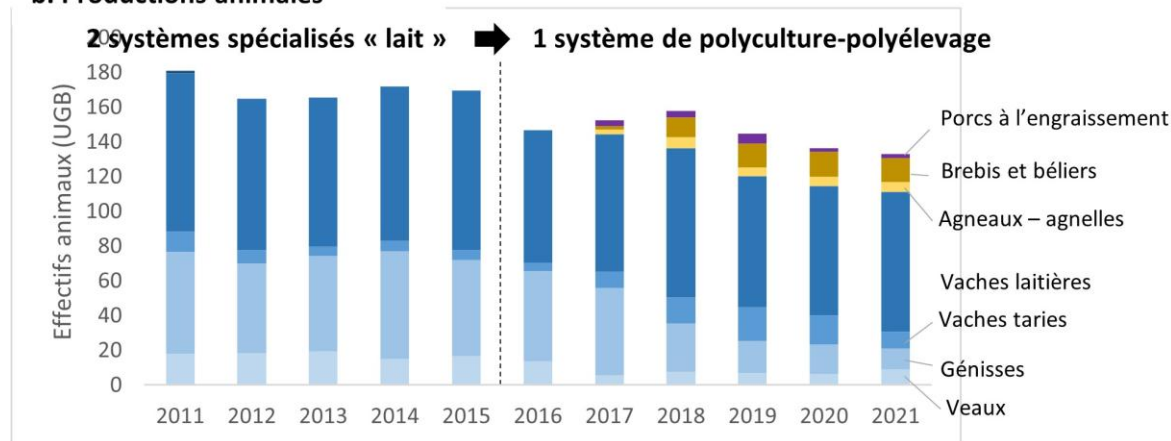


Figure 1 : Evolution des principales productions entre 2011 et 2021 sur l'IE ASTER



2.2. Combiner les approches et niveaux d'organisation pour rendre compte des performances et des conditions de la transition

Nous proposons dans cet article une approche combinant plusieurs méthodes d'analyse des systèmes expérimentés et niveaux d'organisation (animal/parcelle, troupeau/sole, ferme, territoire).

2.2.1. Une typologie multivariée pour étudier la variabilité des performances individuelles

Pour étudier la variabilité des performances des systèmes, nous proposons d'utiliser des typologies (via des Analyses en Composantes Principales). Ces approches, présentent l'intérêt de dépasser des approches monovariées et les valeurs moyennes et écart type associées. Nous proposons de mobiliser ces approches pour rendre compte de la variabilité intra et interannuelle des performances de production. Dans cet article, nous appliquerons ces approches à des productions documentées sur les deux expérimentations : d'une part la qualité des fourrages récoltés (valeurs alimentaires analysées à la consommation – Matières Azotées Totales - MAT, cellulose brute, digestibilité, matières minérales totales – indépendamment de la nature des prairies, permanentes ou temporaires) et d'autre part les performances annuelles de production des vaches laitières (Taux Butyreux TB, Taux Protéique TP, quantité de lait produit annuellement, durée de lactation, performances de reproduction approchées via le nombre de jours de gestation).

Les données individuelles (animal, parcelle) sont agrégées pour rendre compte des performances à l'échelle troupeau et de la sole cultivée, et ainsi rendre compte de leurs transitions, notamment au regard de leurs variabilités.

Les typologies sont réalisées avec le package FactomineR sous R (Lê et al., 2008), sur la base des performances individuelles (parcelle – animal) par année civile sur la période 2011-2021.

2.2.2. Une analyse métabolique pour étudier certaines performances à l'échelle ferme

Ces approches typologiques sont complétées par une approche d'analyse métabolique à l'échelle ferme entière pour rendre compte de la capacité de ces systèmes à valoriser les ressources de leur milieu pour produire des denrées alimentaires. En effet, les typologies permettent difficilement de rendre compte des performances systémiques compte tenu (i) de la présence d'autres ateliers de production (cultures annuelles, porcs et ovins) et (ii) des relations entre ces ateliers de production (intégration cultures-élevages). L'analyse métabolique a été conduite sur la base des flux d'azote (Puech et Stark, 2023). Au regard des enjeux d'autonomie des systèmes étudiés et de leur contribution à l'alimentation humaine, nous proposons d'étudier les performances alimentaires à travers deux indicateurs :

- la productivité alimentaire. La productivité est un indicateur classiquement utilisé en agronomie pour rendre compte des capacités productives d'un système. Elle est définie ici comme l'ensemble des denrées alimentaires (exprimées en kgN en tant que proxy de la production protéique) produites par unité de surface agricole utile, toutes productions confondues (lait, viande, cultures...) ;
- l'efficacité de production alimentaire. Cet indicateur défini par Puech et Stark (2023) permet de rendre compte de la capacité d'un système agricole à transformer des ressources en denrées alimentaires. Il est défini comme le rapport entre l'ensemble des productions alimentaires (lait, viande, cultures) et la biomasse photosynthétique consommée sur l'année (fourrages pâturés, foin consommés, biomasse exportée...).

Ce dernier indicateur s'appuie sur l'hypothèse (i) que le potentiel agronomique d'un système est dynamique car dépendant des conditions météorologiques (particulièrement dans les systèmes autonomes et herbagers ayant peu recours à la fertilisation ou l'irrigation) et par conséquent (ii) que la production primaire (i.e. issue de la photosynthèse) est un proxy pour quantifier l'impact de la variabilité



interannuelle des conditions de milieu sur les potentialités agronomiques du système (Dardonville *et al.*, 2020). Cet indicateur permet en outre (i) de prendre en compte les variations de stocks (animaux, fourrages...) et (ii) de comparer des systèmes conduits de manière asynchrone et ayant bénéficié de conditions météorologiques différentes pour la construction de leurs performances.

2.2.3. Analyse des conditions territoriales de transition

Au-delà des performances techniques, la transition par la diversification s'ancre dans un contexte territorial, qui peut être plus ou moins propice aux activités de diversification (de La Haye Saint Hilaire, 2023), tant en productions animales que végétales. L'installation expérimentale est localisée dans la Zone Intermédiaire (Pierre, 2004), couvrant un territoire allant du département de la Moselle à celui de Charente Maritime, et caractérisé par une pédologie contraignante, une forte dépendance aux aides PAC des exploitations agricoles, une déprise démographique et économique et la faible présence de signes de qualité. Propice « au renouvellement de modèles [cantonné] à des surfaces et cheptels minoritaires », des ruptures maintiennent une polyculture-élevage diversifiée (De la Haye Saint Hilaire, 2023), dans une zone privilégiée de l'émergence de l'agriculture biologique en circuits longs entre 2010 et 2020 (Bermond et Guillemin, 2024). L'attention portée à « l'insertion dans des dynamiques locales et de filières » (Lasseur *et al.*, 2019), apparaît donc essentielle pour l'analyse de la transition vers la diversification. Les productions de l'expérimentation s'inscrivent dans les caractéristiques de l'agriculture du milieu (marchés régionaux coexistant à quelques circuits de proximité, différenciation par les labels biologique et lait de foin, valeurs partagées dans le fonctionnement coopératif, au sein de groupements ou de magasins de producteurs – Brives *et al.*, 2017). Nécessitant des coordinations d'implantations (équilibre de l'offre sur les marchés de diversification pour préserver la valeur), d'approvisionnements, de logistiques à des échelles intermédiaires, elle mêle filières et territoires.

3. Résultats

3.1. Une transition marquée par la variabilité des performances techniques

Les analyses typologiques mettent en avant une forte variabilité des performances intra et interannuelles. En effet, du point de vue de la production fourragère, la qualité des fourrages est hétérogène : on observe un gradient de qualité entre les fourrages de type F1 (fourrages fibreux à faibles valeurs protéiques et peu digestibles) et de type F6 (fourrages riches en matières azotées et facilement assimilables - Figure 2). Les fourrages de type F1-F2-F3 sont principalement issus de foin de 1^{ère} coupe de prairies permanentes ou temporaires alors que les fourrages de type F4-F5-F6 sont plutôt issus de regains (2^{ème}, 3^{ème} coupe), bien que des foin de prairies à forte teneur en légumineuses contribuent également aux types F4 et F6. Les fourrages sont principalement récoltés en sec (et exclusivement depuis 2019), les fourrages enrubannés représentent moins de 5 % des fourrages totaux et sont principalement de bonne qualité fourragère (types F4-F5-F6, indépendamment de la nature des prairies). La distribution des types de fourrages montre une hétérogénéité marquée tant au sein d'une même année (plusieurs types de fourrages une année donnée) qu'entre les années (la proportion de chaque type de fourrage varie selon les années). La Figure 2 met également en avant que les années sèches (i.e. avec un fort déficit hydrique ex 2017 ou 2020) sont propices à la production de fourrages de qualité mais en faible quantité, alors que les années humides (i.e. faible déficit voire excédent hydrique, ex 2013 ou 2016) sont favorables à la production de quantités élevées de fourrages de qualité médiocre voire faible, en lien avec le stade végétatif avancé des prairies à leur récolte (limitée par les fenêtres météorologiques permettant un séchage intégralement au soleil). L'année 2018 fait toutefois exception, avec un déficit marqué au printemps sans pour autant présenter de fenêtre météorologique suffisante de récolte sur la période mai – mi-juin pour la production de fourrages de bonne qualité.

La Figure 2 met également en avant que, d'un point de vue quantitatif, les récoltes de fourrages ne couvrent pas systématiquement les besoins du troupeau bovin. C'est notamment le cas sur la période

2017-2020 avec un déficit structurel de production fourragère liée pour partie à de faibles quantités récoltées et pour partie à des besoins accrus de complémentation au pâturage compte tenu de la pousse limitée d'herbe durant la période estivale. Les reports de stocks de fourrages ont alors constitué un levier important dans la régulation interannuelle vis-à-vis des conditions météorologiques et des besoins du troupeau. Ce levier de régulation est d'autant plus important que le cadre expérimental limite les intrants (pas d'achat de fourrages).

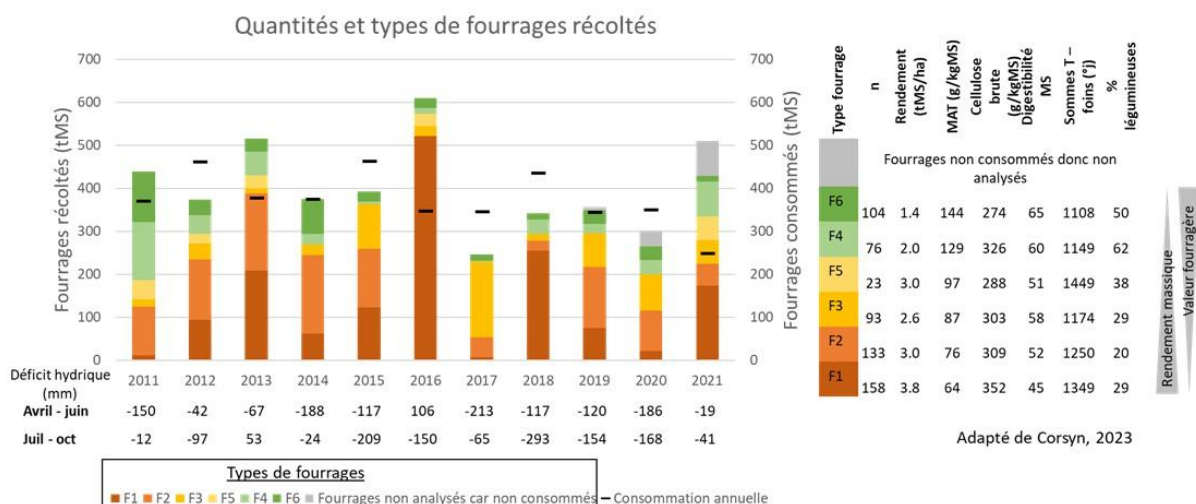


Figure 2 : Evolution des quantités et qualités de fourrages récoltés entre 2011 et 2021 sur l'IE ASTER.

Concernant la production laitière, au-delà de la baisse de production liée au passage à la monotraite, la qualité des fourrages joue un rôle essentiel dans les performances des vaches laitières. Son impact sur la production laitière est d'autant plus marqué que les animaux sont non complémentés en concentrés, cela concerne environ 1/3 du troupeau sur la période 2011-2015 et l'intégralité du troupeau 2016-2021. La typologie des profils productifs des vaches laitières met en avant une diversité marquée de profils (Figure 3). Les profils VL1 et VL2 sont marqués par une production laitière plus élevée que les profils VL3 à VL7, avec des teneurs en matière utile plus faibles, particulièrement au regard des profils VL4-6-7. Les profils VL2-5-6 sont marqués par un faible nombre de jours de gestation, conséquence d'échecs de reproduction (vêlages groupés), qui sont souvent des causes de réforme des vaches laitières (VL5). L'évolution de pratiques d'élevage à partir de 2016 (monotraite, herbivorie stricte) et la réduction du troupeau laitier marquent une rupture dans le volume de lait produit et dans la distribution des profils productifs des vaches laitières (diminution de la prévalence des profils les plus productifs en volume – VL1-2, au profit de profils moins productifs en volume et à meilleurs taux de matières utiles – VL4-6-7). Certains profils semblent spécifiques au choix de conduite associés : le profil VL1 se retrouve quasi exclusivement sur la période 2011-2015 (double traite, apport de concentrés sur une partie du troupeau); les profils VL6-7, principalement sur la période 2016-2021 (monotraite, part croissante de vaches croisées à partir de 2019). Les résultats mettent également en avant que certains profils de vaches laitières se retrouvent sur chacune des 2 périodes (profils VL2-3-4) : la distribution des profils n'est pas exclusivement régie par les pratiques de traite et d'alimentation. Mais au-delà des conséquences de ces évolutions, la figure 3 met en avant une variabilité dans la distribution des profils de vaches laitières au sein de chaque période. Cette variabilité semble plus marquée sur la période 2016-2021 que sur la période 2011-2015, particulièrement au regard des échecs de gestation (forte prévalence du profil VL6 en 2018, 2019 et 2021). Une des causes de ces échecs pourrait résider dans la qualité des fourrages distribués aux animaux en amont de la période de mise en reproduction (foins 2016 de faible qualité, distribués en hiver 2017-2018 et 2018-2019) bien que la relation de causalité ne soit pas formellement établie au moment de la rédaction de l'article.



A l'échelle de l'ensemble du système, la baisse de production (vue à travers la part protéique des productions) du troupeau laitier (Figure 3) lors du changement de système en 2016 a été en grande partie compensée par les activités de diversification animale (porcins et ovins) et végétale (Figure 4a). En effet, la baisse des effectifs animaux et le passage en monotraite a entraîné une baisse de 27 % des productions animales (lait + viande) sur la période 2016-2021 (8.8 kgN/ha) par rapport à la période 2011-2015 (12.2 kgN/ha). Inversement les ventes de productions végétales dédiées à l'alimentation humaine ont progressé de 64 % (7.8 kgN/ha) par rapport à la période précédente où une grande partie des cultures annuelles étaient consommées par les bovins (4.8 kgN/ha).

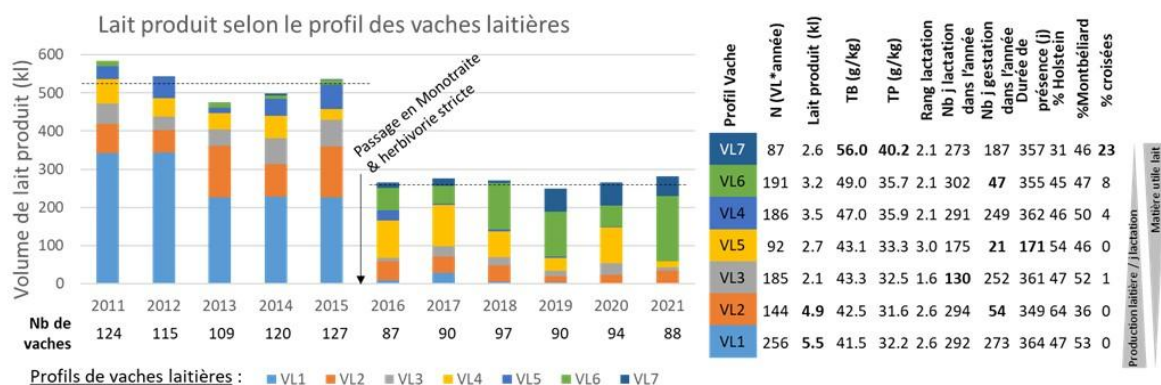


Figure 3 : Evolution de la production laitière selon des profils productifs des vaches laitières sur l'IE ASTER entre 2011 et 2021

Par ailleurs, la transition entre les 2 systèmes entraîne une augmentation de l'efficacité de production alimentaire dans le système diversifié comparé au système spécialisé (Figure 4b). Cette dernière a augmenté, en moyenne, de 3.7 % entre les deux systèmes, malgré des variations interannuelles. Cette augmentation d'efficacité est en partie liée à une utilisation plus efficace des nutriments dans le système diversifié (arrêt de l'utilisation de concentrés pour l'alimentation des ruminants et valorisation directe des cultures pour l'alimentation humaine).

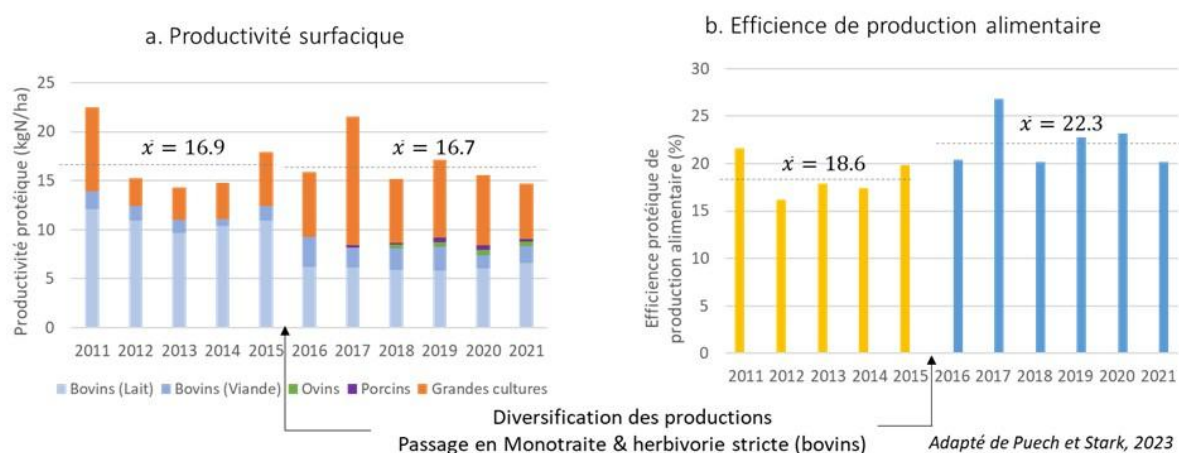


Figure 4 : Evolution a. de la productivité et b. de l'efficacité de production alimentaire sur l'IE ASTER entre 2011 et 2021

3.2. Une transition favorisée par une inscription dans des dynamiques territoriales

PAPILLE s'appuie sur des dynamiques territoriales favorables à l'émergence de ce type d'activités de diversification. En effet, du point de vue des productions animales, l'existence de filières de valorisation des agneaux de boucherie en agriculture biologique a été déterminante pour l'émergence de cette



activité de diversification. Le dynamisme des acteurs pour construire de nouvelles filières est un levier majeur pour la transition des exploitations agricoles. Ainsi, la création en 2020 par les opérateurs d'une filière AB permet depuis une valorisation de ces animaux sous ce signe de qualité (brebis non valorisées en AB jusqu'alors). De même en production bovine, leur dynamisme a permis de créer des conditions favorables à l'émergence d'innovations techniques en élevage bovin lait. Ainsi, alors que les croisements de race laitiers (Jersiais, rouge scandinave...) présentent un intérêt pour la production laitière (taux de matière utile, petits gabarits d'intérêt pour des systèmes herbagers pâturant sur sols peu portants...), ils sont confrontés à des limites dans la valorisation des veaux mâles, généralement vendus à l'export dans le circuit conventionnel, faiblement rémunérateurs pour les éleveurs. Pour répondre à l'augmentation de la demande en viande hachée, Unebio a développé une filière de valorisation de ces animaux (sous condition de 250 kg de carcasse). Cette ouverture de la filière a ainsi offert les conditions favorables à l'émergence d'innovations en levant le verrou de la commercialisation de bœufs croisés laitiers et élevés sous vaches nourrices jusqu'à 9 mois puis exclusivement à l'herbe pour une valorisation à 18-20 mois. Cette expérimentation en cours depuis 2021 s'inscrit dans les recommandations nationales de réorientation du soutien public à l'élevage bovin. Souhaitant favoriser les races et élevages mixtes ainsi que les animaux croisés elles visent « des carcasses plus légères [et] un raccourcissement des cycles de production » tels que suggéré par certaines institutions (Cour des Comptes, 2022).

De plus, des partenariats ont été construits avec des artisans du territoire : une boucherie traditionnelle valorise les porcs plein air élevés sur le système diversifié, alors qu'aucune filière longue n'est présente sur le territoire pour valoriser ce type de production. Pour valoriser l'hétérogénéité des performances de production (étalement du calendrier de finition des animaux), l'expérimentation s'appuie sur l'existence et la proximité d'un abattoir coopératif multi-espèces (Puech *et al.*, 2023, Puech et Stark, 2021). Ce type d'outils de collecte et/ou de 1^{ère} transformation est indispensable au développement de cette activité de diversification¹. Réciproquement, leur présence nécessite une densité minimale d'élevages à proximité pour maintenir leurs activités. Cette dynamique territoriale est le fruit son l'histoire marquée par la polyculture-élevage. Mais leur présence réciproque résulte d'un équilibre fragile. Cette fragilité s'exprime d'autant plus que les productions concernées sont hautement périssables (donc demandent une fréquence élevée de collecte, par exemple pour le lait) ou représentent de faibles volumes rendant peu compétitifs les coûts unitaires collecte et de transformation. Cette diversification implique donc une réflexion sur la composition des cheptels à l'échelle de la ferme, et une coordination des filières de transformations/distribution laitière et viande à l'échelle territoriale (Lasseur *et al.*, 2019), alors que les races et l'élevage mixte (engraissement) peuvent permettre de maintenir les deux types de volumes (Cour des Comptes, 2022).

De la même façon pour les productions végétales, l'installation expérimentale adhère à une coopérative agricole biologique ProBioLor engagée de longue date dans une démarche de diversification (une cinquantaine de produits collectés à l'échelle de la coopérative d'environ 200 adhérents). Comme pour les productions animales, ces filières offrent des conditions favorables aux activités de diversification en productions végétales, particulièrement à destination de l'alimentation humaine. La forte diversification des cultures dans PAPILLE appelle une attention particulière dans le raisonnement des rotations et des itinéraires techniques (délais de retours, exigences agronomiques pour répondre aux attentes des transformateurs). La transition vers la diversification pour l'alimentation humaine s'est accompagnée :

- d'une vigilance accrue vis-à-vis de certaines adventices problématiques (difficultés de triage par exemple en cas de vesces sauvage dans des lentilles ou folle avoine dans l'avoine de floconnerie) ou maladies (carie du blé notamment). Le raisonnement des itinéraires techniques (alternance des cycles culturels, allongement des délais de retour des cultures, mise en place

¹ LE DU G., « Pénurie d'abattoirs pour le porc fermier », *Ouest-France*, 12/02/2024.



de couverture végétale sous céréales, désherbage mécanique, introduction de cultures au pouvoir couvrant), doit être combiné à des dispositifs de tri en ferme ou en coopérative ;

- d'un étalement des calendriers culturels et en particulier des calendriers de récolte (de fin juin à début novembre) pouvant engendrer des besoins de séchage pour certaines cultures récoltées en conditions humides (sarrasin, tournesol, lentille). Des opérations de séchage peuvent être indispensables pour assurer une bonne conservation (mycotoxines). Ces opérations sont généralement réalisées au niveau des coopératives mais se heurtent (i) à des coûts (énergie) et (ii) à des problématiques de saturation des outils de séchage d'autant plus marquées que les fenêtres de récolte sont réduites et que le nombre d'espèces différentes à sécher est important, et pouvant amener à une marginalisation des petits lots.

4. La variabilité des performances : une composante « irréductible » des systèmes autonomes et diversifiés ?

La diversification végétale de PAPILLE pour l'alimentation humaine et le développement de deux ateliers d'élevage (ovins allaitants, porcs) s'appuie largement sur des dynamiques de filières favorables à l'échelle territoriale. Si les filières dont les politiques sont axées sur un nombre réduit de productions peuvent constituer un verrou à la diversification, celles engagées dans la transition agroécologique peuvent activement contribuer à la diversification et l'innovation technique, tant en productions animales que végétales (Meynard *et al.*, 2018, 2013 ; Montagne *et al.*, 2024). Les complémentarités entre différents systèmes de production à l'échelle du territoire (par exemple entre agneaux plein air - agneaux en bergerie ou systèmes bovins laitiers en vêlage d'automne - de printemps) permettent, à l'échelle filière, de limiter pour partie l'impact de la variabilité des performances à l'échelle des fermes. L'établissement de grilles de prix (mensualisation du prix de base du lait, saisonnalisation du prix des agneaux de boucherie) permet aux filières de piloter pour partie la production par rapport à la saisonnalité des besoins de l'aval des systèmes alimentaires. De la même façon, des barèmes de paiement sont associés à des critères de qualité (conformation et engraissement des carcasses, matière utile et qualité sanitaire des laits, teneur en protéines / poids spécifique / humidité / taux d'impuretés des productions végétales) et permettent aux filières de piloter certaines productions au regard des besoins technologiques des transformateurs (voire d'exclure les productions ne respectant pas les critères attendus). La diversification nécessite dès lors l'acquisition de compétences techniques en conduites d'élevages et de cultures pour répondre à ces attentes. L'acquisition de ces compétences est d'autant plus complexe que la diversification est poussée et peut se heurter à une forte charge mentale (découragement lié à l'incertitude qu'amène l'introduction de nouvelles espèces, rythme de travail soutenu sans morte saison), des échecs techniques (problèmes sanitaires, rendements faibles) et des difficultés de rémunération du travail, le tout dans un contexte de changement climatique générant des incertitudes. Les changements qu'impliquent la diversification sur le travail restent un champ de recherches à explorer (Coquil *et al.*, 2018a, 2017b).

Du point de vue des performances techniques, nous montrons dans cet article à partir des exemples de la production laitière et fourragère que les performances des systèmes autonomes sont dépendantes des conditions de milieu. Elles le sont d'autant plus que le cadre est contraint par les choix singuliers d'expérimentation tant en termes de conduites culturales (séchage soleil exclusif des fourrages à partir de 2019) que de conduites d'élevages (arrêt des concentrés en 2016). Plus généralement, le développement des systèmes agricoles durant toute la seconde moitié du xx^e siècle s'est appuyée sur une relative stabilité des conditions environnementales, posant comme hypothèse (souvent implicite) que la potentialité agronomique d'un milieu est invariante et peu limitante sous réserve d'un accès suffisant aux intrants (engrais, pesticides, eau). Les « accidents climatiques » observés durant cette période (ex sécheresse de 1976) étaient considérés comme conjoncturels. Or, depuis une vingtaine d'années, on assiste à une augmentation de la fréquence de ces irrégularités, en tant que facteur de



premier ordre des variabilités de performances de production agricoles en France (Académie d'agriculture de France, 2024, 2017). Les changements climatiques en cours devraient accentuer cette variabilité des conditions de milieu (Lee *et al.*, 2023). Dès lors, cette variabilité structurelle et les conséquences attendues sur les agrosystèmes questionnent la nature des méthodes et des indicateurs pour rendre compte des performances de production. Au-delà de métriques classiques (moyennes, écart-type, quantiles), les approches typologiques explorées dans cet article peuvent être un outil intéressant pour rendre compte (i) de la multi dimensionnalité des performances (production laitière, matière utile des laits, performances de reproduction...), (ii) des dynamiques de ces performances (variabilité tant intra qu'inter-annuelle) tout (iii) en apportant des éléments sur les changements d'échelle (animal/parcelle et troupeau/sole cultivée). Plus globalement, cela questionne (i) l'intérêt des complémentarités entre les différentes composantes des systèmes diversifiés (particulièrement au regard de l'enjeu de rémunération du travail en agriculture) et (ii) les pratiques agricoles et les mécanismes de régulation interannuels pour tamponner l'impact des conditions de milieu sur les performances de production à l'échelle des fermes (stockage de fourrages...).

5. Conclusion

Dans cet article, nous étudions la transition d'un système de polyculture-élevage à dominance bovin lait vers un système très diversifié. Nous explorons cette transition sur le plan biotechnique et mettons en avant une variabilité intra et interannuelle des performances biotechniques, tant en productions végétales qu'animales. D'une part, si cette variabilité résulte de processus biologiques complexes, elle est également la conséquence des choix de gestion rendant le système plus dépendant aux conditions de milieu. D'autre part, l'analyse des conditions territoriales d'émergence de ce système montre que la présence sur le territoire d'acteurs des filières (filières, outils de première transformation) ouverts à une grande variété de productions agricoles est propice à la transition vers la diversification par rapport à des territoires spécialisés. Le maintien et le développement de ces infrastructures ouvertes aux activités de diversification est un enjeu majeur pour accompagner les transitions agroécologiques. L'implication des politiques, à l'image du fond gouvernemental de garantie de 50M€ lancé fin 2023 pour préserver un maillage d'abattoirs stratégiques pour les territoires, est d'autant plus importante que le secteur de l'élevage (i) traverse une crise majeure d'attractivité (rythme, rémunération du travail) et (ii) sera particulièrement affecté par les changements climatiques à venir.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Thomas PUECH : <https://orcid.org/0000-0003-2192-9719>

Amandine DURPOIX : <https://orcid.org/0009-0006-3651-0696>



Bénédicte AUTRET : <https://orcid.org/0009-0009-9640-0108>

Laurent BRUNET : <https://orcid.org/0009-0004-8934-6725>

Damien FOISSY : <https://orcid.org/0009-0008-0867-8402>

Sara PARISOT : <https://orcid.org/0000-0001-7539-4479>

Pierre GUILLEMIN : <https://orcid.org/0000-0002-5319-2208>

Contributions des auteurs

Conceptualisation, Analyse, Validation, Visualisation : TP

Données : AD, LB, DF, TP, BA

Administration du projet, Ressources, Supervision : AD, BA, TP, LB, DF

Méthodologie, Rédaction – relecture et édition : TP, AD, BA, LB, DF, SP, PG

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient (i) l'ensemble de l'équipe technique de l'UR ASTER pour la collecte des données utilisées pour ce travail, (ii) Louise Corsyn pour la mise en forme et l'analyse des données (fourrages).

Références bibliographiques

Académie d'agriculture de France, 2017. Progression comparée des rendements moyens français du blé tendre et du maïs grain (1960-2017). Encyclopédie.

Académie d'agriculture de France, 2024. Evolution du rendement moyen annuel du blé France entière de 1815 à 2024. Encyclopédie.

Altieri, M.A., Funes-Monzote, F.R., Petersen, P., 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>

Benoit, M., Mottet, A., 2023. Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock. *Agric. Syst.* 205, 103585. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103585>

Benoit, M., Barbieri, P., Dumont, B., 2024. Quel élevage pour une agriculture biologique performante ? *INRAE Prod. Anim.* 7372. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.2.7372>

Bermond, M., Guillemin, P., 2024. Vers une transition des systèmes agricoles en France métropolitaine ? Une géographie contrastée et en mouvement (2010 et 2020). *Cybergeog.* <https://doi.org/10.4000/cybergeog.40955>

Billen, G., Lassaletta, L., Garnier, J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Glob. Food Secur.* 3, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>

Brives, H., Chazoule, C., Fleury, P., Vandenbroucke, P., 2017. La notion d'« agriculture du milieu » est-elle opérante pour l'analyse de l'agriculture de Rhône-Alpes ? *Économie Rurale* 41–56. <https://doi.org/10.4000/economierurale.5109>

Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M., Hall-Spencer, J.M., Ingram, J.S.I., Jaramillo, F., et al., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecol. Soc.* 22, art8. <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>



- Coquil, X., Blouet, A., Fiorelli, J.-L., Bazard, C., Trommenschlager, J.-M., 2009. Conception de systèmes laitiers en agriculture biologique : une entrée agronomique. *INRAE Prod. Anim.* 22, 221–234. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2009.22.3.3349>
- Coquil, X., Fiorelli, J.-L., Blouet, A., Trommenschlager, J.-M., Bazard, C., Mignolet, C., 2011. Conception de systèmes de polyculture élevage laitiers en agriculture biologique : Synthèse de la démarche pas à pas centrée sur le dispositif expérimental INRA ASTER-Mirecourt, in: *Rencontres Recherches Ruminants*. Paris, pp. 57–60.
- Coquil, X., Brunet, L., Hellec, F., Pailleux, J.-Y., 2017a. Conception d'une conduite de génisses laitières sous vaches nourrices : pour une intensification écologique des systèmes d'élevage herbager ? *Fourrages* 231, 213–222.
- Coquil, X., Dedieu, B., Béguin, P., 2017b. Professional transitions towards sustainable farming systems: The development of farmers' professional worlds. *Work* 57, 325–337. <https://doi.org/10.3233/WOR-172565>
- Coquil, X., Cerf, M., Auricoste, C., Joannon, A., Barcellini, F., Cayre, P., Chizallet, M., Dedieu, B., Hostiou, N., Hellec, F., et al., 2018a. Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0524-4>
- Coquil, X., Franck, C., Veysset, P., Pailleux, J.-Y., Fiorelli, J.-L., et al., 2018b. Richesse créée, rémunération et transformations du travail en systèmes laitiers économes et autonomes en agriculture biologique. *Fourrages* 235, 175–180.
- Coquil, X., Anglade, J., Barataud, F., Brunet, L., Durpoix, A., Godfroy, M., 2019. TEASER-lab : concevoir un territoire pour une alimentation saine, localisée et créatrice d'emplois à partir de la polyculture - polyélevage autonome et économe. La diversification des productions sur le dispositif expérimental ASTER-Mirecourt. *Innov. Agron.* 72, 61–75.
- Corsyn, L., 2023. Construction de l'autonomie fourragère dans un système de polyculture-polyélevage diversifié et autonome : le cas du système expérimenté sur le site INRAE de Mirecourt (Rapport de 2ème année de BUT Génie Biologique option Agronomie).
- Cour des comptes, 2022. Les soutiens publics aux éleveurs de bovins. Rapport S2023-0466. 137p.
- Dardonville, M., Urruty, N., Bockstaller, C., Therond, O., 2020. Influence of diversity and intensification level on vulnerability, resilience and robustness of agricultural systems. *Agric. Syst.* 184, 102913. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102913>
- De La Haye Saint Hilaire, L., 2023. Dynamiques agricoles et agro-industrielles en zone intermédiaire de polyculture-élevage. Une géographie des filières pour penser la transformation des systèmes agrialimentaires. Thèse de Géographie. Université Paris-Saclay.
- Dumont, B., González-García, E., Thomas, M., Fortun-Lamothe, L., Ducrot, C., Dourmad, J.-Y., Tichit, M., 2014. Forty research issues for the redesign of animal production systems in the 21st century. *Animal* 8, 1382–1393. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001281>
- Experton, C., Bellet, V., Gac, A., Morin, E., Degloire, J.-F., Laignel, G., Benoit, M., 2018. Double enjeu dans les systèmes ovins biologiques : renforcer l'autonomie alimentaire et créer de la valeur ajoutée au sein de la filière (AgneauxBio). *Innovations agronomiques* 63, 337-356. <https://doi.org/10.15454/1.5191188300688562E12>
- Fiorelli, J.-L., Trommenschlager, J.-M., Lavé, R., Echampard, L., Godfroy, M., Bazard, C., 2018. Interactions cultures - élevage et autonomie alimentaire d'un troupeau laitier en agriculture biologique. *Fourrages* 235, 169–173.
- Gliessman, S.R., 2004. Agroecology and Agroecosystems, in: Diane, R., Francis, C. (Eds.), *Agronomy Monographs*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 19–29. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr43.c2>
- Harchaoui, S., Chatzimpiros, P., 2019. Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013. *J. Ind. Ecol.* 23, 412–425. <https://doi.org/10.1111/jiec.12760>
- Jepsen, M.R., Kuemmerle, T., Müller, D., Erb, K., Verburg, P.H., Haberl, H., Vesterager, J.P., et al., 2015. Transitions in European land-management regimes between 1800 and 2010. *Land Use Policy* 49, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.07.003>



Lasseur, J., Bonaudo, T., Choisis, J.-P., Houdart, M., Napoléone, M., Tichit, M., Dedieu, B., 2019. Élevage et territoires : quelles interactions et quelles questions ? INRA Prod. Anim. 189–204. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2504>

Lê, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. J. Stat. Softw. 25, 1–18.

Lee, H., Calvin, C., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Blanco, G., *et al.*, 2023. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report. IPCC.

Magne, M.-A., Alaphilippe, A., Bérard, A., Cournut, S., Dumont, B., Gosme, M., Hedde, M., *et al.*, 2024. Applying assessment methods to diversified farming systems: Simple adjustment or complete overhaul? Agric. Syst. 217, 103945. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103945>

Martin, G., Perrin, A., Rouger, S., 2024. L'élevage bovin laitier en agriculture biologique, une quête d'équilibre à tous les niveaux. INRAE Prod. Anim. 37, 7355–7355. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.2.7355>

Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières.

Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Charlier, A., Messéan, A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. Agron. Sustain. Dev. 38, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>

Meynard, J.-M., Cerf, M., Coquil, X., Durant, D., Le Bail, M., Lefèvre, A., Navarrete, M., *et al.*, 2023. Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. Eur. J. Agron. 150, 126948. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126948>

Montagne, L., Alibert, L., Md Bonnefont, C., Choisis, J.-P., Durpoix, A., Gilbert, H., Harchaoui, S., *et al.*, 2024. Quels défis au développement de la production porcine en agriculture biologique en France ? INRAE Prod. Anim. 7398. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2024.37.2.7398>

Pierre, G., 2004. Agriculture dépendante et agriculture durable : la PAC et les plateaux du sud-est du Bassin parisien. Publications de la Sorbonne.

Puech, T., Py, V., Durpoix, A., 2021. Elever des porcs pour valoriser des fourrages et des productions non commercialisables en alimentation humaine dans un système agricole diversifié et autonome : performances zootechniques et points critiques. Fourrages 248, 35–46.

Puech, T., Durpoix, A., Autret, B., Brunet, L., Foissy, D., Guillemin, P., 2023. Construction et implications de l'autonomie protéique fourragère dans un système de polyculture-élevage diversifié. Fourrages 254, 15–26.

Puech, T., Stark, F., 2023. Diversification of an integrated crop-livestock system: Agroecological and food production assessment at farm scale. Agric. Ecosyst. Environ. 344, 108300. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108300>

Schott, C., Puech, T., Mignolet, C., 2018. Dynamiques passées des systèmes agricoles en France : une spécialisation des exploitations et des territoires depuis les années 1970. Fourrages 235, 153–161.

Pour citer cet article : Thomas Puech, Amandine Durpoix, Bénédicte Autret, Laurent Brunet, Damien Foissy, *et al.* Une transition par la diversification d'un système de polycultureélevage : variabilité des performances techniques et conditions territoriales d'émergence. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.1-13. [10.17180/ciaq-2025-vol106-art01](https://doi.org/10.17180/ciaq-2025-vol106-art01)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



Vers l'autonomie azotée en agriculture biologique : une étude de cas théorique sur un territoire français

Fabrice BELINE¹, Marylou BLONDEL², Sara LARCHER², Niels BIZE³, Antoine BOUTIER¹, Aurélie WILFART¹, Fanny VERGELY¹, Souhil HARCHAOU¹

¹ INRAE SAS, 65 rue de Saint Briec, CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France

² INRAE OPALE, 17 avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 Rennes Cedex, France

³ FRAB, 29 avenue des Peupliers, 35510 Cesson-Sévigné, France

Correspondance : fabrice.beline@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art02>

Résumé

Le développement de l'agriculture biologique (AB) se heurte au défi de la disponibilité en azote (N). Des travaux explorent cette problématique à des échelles globales, laissant un vide en matière d'analyse à l'échelle locale. Ainsi, ce travail développe une méthodologie à l'échelle locale pour modéliser l'évolution de l'AB et évaluer son autonomie en N en fonction des dynamiques de développement. Cinq scénarios ont été construits et modélisés. Les résultats montrent la difficulté d'atteindre l'autonomie au niveau du territoire tout en offrant des pistes pour l'améliorer. Une optimisation du système engendre une légère augmentation de l'autonomie, mais cela reste insuffisant et des changements structurels sont nécessaires. L'usage de terres agricoles partiellement dédiées à la production de fertilisants organiques s'avère un levier incontournable pour améliorer l'autonomie en N mais engendre, en contrepartie, une réduction de la productivité surfacique du territoire.

Mots-clés : circularité, élevage, légumineuse, méthanisation, extensification

Abstract: Towards nitrogen self-sufficiency in organic farming: a theoretical case study on a French territory

The development of organic farming (OF) faces the challenge of nitrogen (N) availability. Recent studies explore this issue focusing on global scales, leaving a gap in terms of analysis at the local scale. This work develops a methodology at the local scale to model the OF evolution and assess its N self-sufficiency according to development scenarios. Five scenarios were constructed and modeled. The results show the difficulty of achieving this self-sufficiency at the territorial level while offering several ways to improve it. An optimization of the system results in a slight increase in the N self-sufficiency but this remains insufficient and structural changes are therefore necessary. The use of agricultural land partially dedicated to the production of organic fertilizers seems to be an essential lever for moving towards self-sufficiency but leads in return to a reduction in the land productivity of the territory.

Keywords: circularity, livestock, legume, anaerobic digestion, extensification

1. Introduction

En France, et plus généralement en Europe, le développement de l'agriculture biologique (AB) est devenu une préoccupation majeure des pouvoirs publics dans le but de réduire les impacts environnementaux de la production alimentaire et de contribuer à l'atteinte des objectifs mondiaux en matière de climat et de biodiversité. Récemment, le « Pacte Vert » proposé par l'Union européenne vise à développer l'AB à hauteur de 25 % des surfaces agricoles utiles (SAU) d'ici 2030 alors qu'elle représente actuellement environ 10 % (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire,



2023). De même, la politique agricole commune 2023-2027 de l'Union européenne a pour objectif de développer les surfaces d'AB à 18 % de la SAU en 2027. Ces objectifs d'expansion de l'AB répondent également aux attentes des consommateurs en matière de produits sains et de préservation de l'environnement.

En parallèle de ces politiques publiques favorables à l'expansion de l'AB, la capacité de l'AB à nourrir la population mondiale est régulièrement remise en question, notamment en raison des rendements des cultures 20 à 25 % inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle (AC) (De Ponti *et al.*, 2012 ; Ponisio *et al.*, 2015 ; Seufert *et al.*, 2012). Comme mentionné par Barbieri *et al.* (2023), plusieurs études montrent que la carence en azote (N), élément essentiel pour la croissance des plantes, est, à court terme, le principal facteur limitant ces rendements dans les systèmes AB. De plus, selon de récentes études, cette carence pourrait s'aggraver si l'AB devait se développer de manière importante (Barbieri *et al.*, 2021 ; Smith *et al.*, 2018) du fait de sa dépendance à l'AC pour la fertilisation des sols en N. En France, la dépendance de l'AB vis à vis de l'AC pour sa fertilisation N des terres cultivées à travers l'utilisation des effluents d'élevage issus de l'AC est estimée à 20 % d'après Vergely *et al.* (2024). Pour remédier à cette problématique, plusieurs études proposent des changements dans le système de production agricole tels que la généralisation des systèmes de culture avec des légumineuses ainsi que la reconnexion de l'élevage et des cultures. Par ailleurs, des recommandations plus vastes concernent le système alimentaire, avec la réduction de la consommation de produits animaux et la réduction du gaspillage alimentaire (Muller *et al.*, 2017 ; Poux et Aubert, 2018 ; Billen *et al.*, 2021). Toutefois, selon Barbieri *et al.* (2021) à l'échelle mondiale, ces changements ne permettraient pas d'aller au-delà de 60 % de la SAU en AB sans carence en N. Pour aller au-delà, Billen *et al.* (2021) proposent d'ajouter aux mesures citées précédemment le recyclage des excréments humains, ce qui permet, à l'échelle européenne, d'ouvrir des possibilités pour atteindre 100 % de la SAU en AB sans carence en N. Des travaux récents à l'échelle de la France (Starck *et al.*, 2024) illustrent ces opportunités liées à l'usage des excréments humains pour la fertilisation des sols même si cette possibilité n'est actuellement pas permise dans le cadre réglementaire de l'AB.

Au vu de ces travaux et résultats, la gestion de l'N en AB et le développement de leviers pour pallier cette carence et tendre vers l'autonomie jouent sans aucun doute un rôle clé pour le développement de l'AB sur le long terme. Ce rôle clé explique les différentes études publiées récemment sur cette problématique et sur les leviers disponibles pour résoudre la dépendance de l'AB à l'AC vis-à-vis de l'N (Barbieri *et al.* 2023, Barbieri *et al.* 2021, Smith *et al.* 2018, Muller *et al.*, 2017 ; Poux et Aubert, 2018 ; Billen *et al.* 2021, Reimer *et al.* 2024, Vergely *et al.* 2024). Cependant, la plupart de ces études ont été réalisées à des échelles globales (mondiale ou nationale) et elles ne prennent pas explicitement en compte les spécificités des territoires. Les résultats qui en découlent sont alors difficilement appropriables par les acteurs locaux. Pour une meilleure compréhension des caractéristiques des territoires dans ces enjeux d'autonomie en N et afin d'en faciliter l'appropriation par les acteurs, l'objectif de ce travail a été de développer une méthodologie de modélisation des flux d'N en AB à une échelle fédérant les différents acteurs d'un territoire autour des questions agricoles, alimentaires et environnementales. Pour illustrer cette méthodologie, l'échelle de l'EPCI (établissements publics de coopération intercommunale) incluant plusieurs communes a été choisie. La méthodologie développée a ainsi permis de conceptualiser les flux d'N de l'AB du territoire et de calculer l'impact des leviers répertoriés dans la littérature pour améliorer son autonomie tout en favorisant son expansion.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques du territoire étudié

Le territoire d'étude est la communauté de communes de Morlaix (Morlaix Communauté), située au Nord-Ouest de la Bretagne dans le département du Finistère (France) et composée de 26 communes. Il



s'agit d'un territoire à dominante rurale avec 64 603 habitants et une SAU de 39 772 hectares. Une seule commune, Morlaix, compte plus de 10 000 habitants avec environ 15 000 habitants tandis que les autres comptent toutes moins de 5 000 habitants. En 2021, ce territoire compte 98 exploitations en AB sur 3 954 ha, soit 9.9 % de la SAU totale (Observatoire de la production biologique en Bretagne, 2021). Pour l'AB comme pour l'AC, l'élevage bovin laitier et le maraîchage sont prédominants sur ce territoire représentant, respectivement, 31 % et 11 % des exploitations en AC (DRAAF, 2020). Par conséquent, les prairies et fourrages et le maraîchage couvrent, respectivement, 66 et 6 % des surfaces AC et 71 et 16 % des surfaces AB. Le taux de chargement animal de l'AB exprimé en unité gros bétail (UGB) est estimé à 1,01 UGB.ha⁻¹ de SAU incluant principalement des bovins (65 %), des porcs (18 %) et des volailles (14 %). Ce territoire comprend une baie affectée par la croissance et l'échouage d'algues vertes sur les plages qui est incluse dans les Plans Algues Vertes en vigueur depuis 2010 visant à réduire les nitrates dans les eaux de surface.

2.2. Description du modèle et limites du système

L'étude s'est concentrée sur les flux d'N au sein du système de production agricole AB de ce territoire incluant la production végétale et animale. Les limites du système comprenaient toutes les surfaces agricoles et tout l'élevage AB du territoire ainsi que les échanges d'aliments du bétail et d'effluents d'élevage au sein de l'AB du territoire, mais excluaient la transformation des aliments, la vente au détail et la consommation. Trois principaux sous-systèmes de production distincts sont considérés pour la modélisation des flux d'N : (i) les sols AB incluant les cultures et les prairies, (ii) l'élevage AB et (iii) la gestion des effluents issus de l'élevage AB. Tous les flux considérés sont répertoriés dans le tableau 1. Les entrées d'azote considérées dans le système sont la fixation biologique de l'azote (BNF), les dépôts atmosphériques (Atm_N), les importations d'effluents d'élevage ou de déchets organiques issus de l'AC, des municipalités ou de l'AB extérieures au territoire (Imp_{N_organic}) et les importations d'aliments pour l'élevage AB issues de l'extérieur du territoire (Imp_{N_feed}). Les sorties d'azote du système sous forme de produits sont les cultures issues de la production maraîchère (Exp_{N_vege}) et des prairies, fourrages et grandes cultures (Exp_{N_plant}), la production animale (Exp_{N_anim}) et les effluents d'élevage (Exp_{N_manure}). En plus de ces productions, les autres sorties du système sont considérées comme des pertes :

- la lixiviation de l'azote issu des sols agricoles AB (Lix_N) ;
- la dénitrification des sols AB (Denit_N) ;
- les émissions d'ammoniac suite à l'épandage des effluents d'élevage sur les sols AB (N_{NH3_spr}) ;
- les émissions d'ammoniac (et N₂, N₂O) provenant du stockage et du traitement des effluents d'élevage AB (N_{NH3_st&p}) ;
- les émissions d'ammoniac (et N₂, N₂O) provenant des bâtiments d'élevage AB (N_{NH3_bu}).

En complément, les flux internes pris en compte sont :

- les plantes AB récoltées (Harv_{N_grass} et Harv_{N_crop}) utilisées pour nourrir les animaux AB (Feed_{N_rum} et Feed_{N_mono}) ;
- les effluents d'élevage AB directement excrétés lors du pâturage (Manure_{N_past}) ;
- les effluents d'élevage AB provenant des bâtiments (Manure_{N_build}) passant par le stockage et le traitement (Manure_{N_st&p}) et utilisé comme engrais sur les terres AB (Manure_{N_ferti}).

Les évolutions potentielles des stocks dans les sols sont considérées comme nulles.

Tableau 1 : Liste des flux d'N considérés (kgN.an⁻¹) et description des méthodes de calcul.

CATEG	S/SYST	DESCRIPTION DE LA VARIABLE	ABREV	METHODE	DE
-------	--------	----------------------------	-------	---------	----



ORIE	EME		IATION	CALCUL
ENTREE	Elevage	N importé pour l'alimentation animale AB provenant de l'extérieur du territoire	Imp _{N_fee} d	Algorithme N°1
ENTREE	Sols	N issu de la déposition atmosphérique sur les sols AB du territoire	Atm _N	$r_{dep} \times surface_{AB}$
ENTREE	Sols	Fixation biologique de N issue des cultures et des prairies AB du territoire	BNF	$\sum (surface_{leg_i} \times \%leg_i / 100 \times r_{fix_i} \times Rdt_i)$
ENTREE	Sols	N organique importé pour la fertilisation des sols AB du territoire et issu de l'AC et/ou de l'extérieur du territoire	Imp _{N_org} anic	Algorithme N°3
Pertes	Sols	N dénitrifié issu des sols AB du territoire	Denit _N	$r_{denit} \times surface_{AB}$
PERTES	Sols	N volatilisé lors de la fertilisation et du pâturage des sols AB du territoire	N _{NH3_spr}	$FE_{spr_k} \times Manure_{N_Ferti} + FE_{past} \times Manure_{N_past} / 100$
PERTES	Sols	N lixivié à partir des sols AB du territoire	Lix _N	$r_{lix} \times surface_{AB}$
Pertes	Elevage	N volatilisé à partir des bâtiments d'élevage AB du territoire	N _{NH3_bu}	$\sum (FE_{bu_k} \times Manure_{N_excreted_k})$
Pertes	Effluents	N volatilisé lors du stockage et du traitement des effluents d'élevage AB du territoire	N _{NH3_st&p}	$\sum (FE_{st&p_k} \times Manure_{N_build_k})$
Interne	Sols	N récolté ou pâturé issu des prairies ou des fourrages AB du territoire	Harv _{N_gr} ass	$\sum (surface_{grass_i} \times Rdt_i \times Nc_i) + \sum (surface_{fodder_i} \times Rdt_i \times Nc_i)$
Interne	Sols	N récolté des cultures AB du territoire autres que les légumes	Harv _{N_cr} op	$\sum (surface_{crop_i} \times Rdt_i \times Nc_i)$
InternE	Elevage	N des effluents excrété lors du pâturage en AB	Manure N _{_past}	$\sum (Manure_{N_excreted_k} \times time_{past_j} / 100)$
InternE	Elevage	N des effluents d'élevage AB en sortie des bâtiments	Manure N _{_build}	$Manure_{N_excreted} - Manure_{N_past} - N_{NH3_bu}$
InternE	Effluents	N des effluents d'élevage AB en sortie de stockage et traitement	Manure N _{_st&p}	$Manure_{N_build} - N_{NH3_st&p}$
InternE	Effluents	N des effluents d'élevage AB en sortie de stockage et traitement utilisé pour la fertilisation des sols AB du territoire	Manure N _{_Ferti}	Algorithme N°3
InternE	Sols	N requis pour l'alimentation des ruminants AB du territoire (prairies, fourrages et cultures)	Feed _{N_r} um	$Manure_{N_excreted_rum} / (1 - NCE_{rum_j})$
InternE	Effluents	N requis pour l'alimentation des monogastriques AB du territoire (cultures)	Feed _{N_mono}	$Manure_{N_excreted_mono} / (1 - NCE_{mono_j})$
SORTIE	Sols	N des légumes AB récoltés sortant du	Exp _{N_ve}	$\sum (surface_{vege_i} \times Rdt_i \times$



		système	ge	Nc)
SORTIE	Sols	N issu des prairies, des fourrages et des cultures AB sortant du système	Exp _{N_plant}	Algorithme N°1
SORTIE	Elevage	N issu de l'élevage AB sortant du système	Exp _{N_animal}	Manure _{N_excreted} /NCE
SORTIE	Effluents	N issu des effluents AB sortant du système	Exp _{N_manure}	Algorithme N°2

i: sous-catégories de culture, *j*: sous-catégories animales, *k*: catégories d'effluents d'élevage, *surface*: surface agricole AB du territoire (ha), %*leg*: taux de légumineuse dans la culture considérée (%), *r_{fix}*: taux de fixation biologique de l'azote de la culture (kgN.ha⁻¹.t⁻¹), *r_{dep}*: taux surfacique de déposition atmosphérique (kgN.ha⁻¹.an⁻¹), *r_{denit}*: taux surfacique de dénitrification des sols agricoles (kgN.ha⁻¹.an⁻¹), *r_{lix}*: taux surfacique de lixiviation des sols agricoles (kgN.ha⁻¹.an⁻¹), *Rdt*: rendement de la culture (t.ha⁻¹), *Nc*: contenu azoté de la culture récoltée (kgN.t⁻¹), *Manure_{N_excreted}*: N excrété par les animaux calculé comme $\sum(\text{nombre animaux}_i \times \text{Manure}_{N_excreted_i})$, *FE_{spr}*: facteur d'émission d'N lors de l'épandage des effluents (kgN.kgN⁻¹), *FE_{past}*: facteur d'émission d'N des effluents lors du pâturage (kgN.kgN⁻¹), *FE_{bu}*: facteur d'émission d'N des effluents dans les bâtiments d'élevage (kgN.kgN⁻¹), *FE_{st&p}*: facteur d'émission d'N lors du stockage et du traitement des effluents (kgN.kgN⁻¹), *time_{past}*: Pourcentage du temps sur l'année passé par les animaux à l'extérieur en pâturage ou sur parcours (%), *NCE_{rum}*: Coefficient d'efficacité de conversion de l'N des ruminants (kgN.kgN⁻¹), *NCE_{mono}*: Coefficient d'efficacité de conversion de l'N des monogastriques (kgN.kgN⁻¹)

2.3. Collecte de données et estimation des flux d'azote

À partir des données de surfaces des différentes catégories et sous-catégories de cultures AB et du nombre d'animaux d'élevage AB par catégorie, tous les flux d'N du scénario considéré sont calculés (Tableau 1). Les références statistiques nationales ou issues de la littérature sur les terres cultivées et les prairies (Beline, 2025) ont permis de calculer BNF, Harv_{N_grass}, Harv_{N_crop} et Exp_{N_vege}.

Les flux Atm_N, Lix_N et Denit_N ont été calculés en considérant des flux moyens par unité de surface *r_{atm}*, *r_{lix}* et *r_{denit}* égaux à 10, 18,6 et 10 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, respectivement (Benoit 2014, Ronceux A. & Favrelière E. 2017). Trois catégories de cultures ont été considérées (herbe et fourrage, légumes et fruits, autres cultures) agrégeant 28 sous-catégories. Les légumes et fruits récoltés (Exp_{N_vege}) sont directement considérés comme des sorties du système allant vers l'alimentation humaine. De la même manière, les données sur le cheptel et les déjections issues de la littérature ou des références statistiques nationales (Beline, 2025) ont permis de calculer Manure_{N_past}, Exp_{N_anim}, Feed_{N_rum}, Feed_{N_mono}, Manure_{N_build}, NNH_{3_bu}, NNH_{3_st&p}, Manure_{N_st&p}. Deux catégories d'animaux ont été considérées (ruminants et monogastriques) incluant 19 sous-catégories et 7 jeux de données de facteurs d'émission ont été pris en compte selon les types d'effluents d'élevage. Après ces calculs, Imp_{N_feed} et Exp_{N_plant} sont calculés en considérant que le fourrage et l'herbe récoltés ou pâturés (Harv_{N_grass}) sont d'abord utilisés pour l'alimentation des ruminants AB du territoire. Si Harv_{N_grass} est supérieur aux besoins des ruminants AB du territoire (Feed_{N_rum}), l'excédent est exporté tandis que si cette production est inférieure à Feed_{N_rum}, d'autres sources sont considérées pour l'alimentation des ruminants (autres cultures du territoire ou N extérieur au territoire). Ensuite, les autres cultures récoltées (Harv_{N_crop}) sont d'abord utilisées pour l'alimentation animale [monogastriques (Feed_{N_mono}) et aussi ruminants si le fourrage et l'herbe ne sont pas suffisants (Feed_{N_rum} restant)]. Si la production des autres cultures est supérieure aux besoins de l'alimentation animale, l'excédent est exporté tandis que si cette production est inférieure aux besoins des animaux, le déficit est considéré comme importé de l'extérieur (Imp_{N_feed}). Ensuite, Manure_{N_ferti} et Exp_{N_manure} sont calculés en considérant que le fumier provenant du stockage et de la transformation (Manure_{N_st&p}) est d'abord utilisé comme engrais pour les terres cultivées et les prairies. À cette étape, le besoin en fertilisation est calculé comme la différence entre les sorties du compartiment terres cultivées et prairies et les entrées déjà calculées du même compartiment (Atm_N et BNF). Si Manure_{N_st&p} dépasse les besoins en fertilisation, l'excédent est exporté. En revanche, si Manure_{N_st&p} est inférieur aux besoins, le déficit est considéré comme importé de l'extérieur (Imp_{N_organico}).



correspondant à de l'engrais organique N provenant soit de l'extérieur du système AB du territoire, soit d'autres territoires. En moyenne, aucune variation annuelle des stocks d'azote du sol n'est prise en compte.

Les statistiques agricoles nationales ont été utilisées pour les rendements des cultures (Beline, 2025). Lorsqu'elles étaient disponibles, les rendements spécifiques à l'AB ont été utilisés. Sinon, par défaut et à dire d'expert, des rendements équivalents à 80 % de l'AC ont été considérés. Le taux de légumineuses dans les cultures (ou les cultures mixtes) (%leg) est déterminé sur la base d'avis d'experts locaux en AB. Le taux de fixation d'azote (r_{fix}) est extrait de la littérature, en tenant compte d'un taux proportionnel au rendement. La teneur en azote des cultures récoltées (N_c) est issue de références nationales. L'azote excrété dans les déjections animales ($Manure_{N_excreted}$) est issu de références nationales (Beline, 2025). Lorsque disponible, les données spécifiques à l'AB ont été privilégiées. Dans le cas contraire, le mode d'élevage le plus proche a été utilisé. Le pourcentage de temps sur l'année pendant lequel les animaux sont au pâturage ou à l'extérieur ($time_{past}$) est issu d'avis d'experts locaux en AB. Les rendements de conversion de l'azote (NCE) sont issus de la littérature et d'avis d'experts. Les facteurs d'émission (Beline, 2025) correspondant aux émissions gazeuses du pâturage (FE_{past}) et de l'épandage (FE_{spr}) sont issus de la littérature en considérant les catégories d'animaux et le mode d'élevage proches des pratiques AB tandis que les facteurs d'émission pour le bâtiment (FE_{bu}) et le stockage et la transformation des effluents ($FE_{st\&p}$) sont issus de références nationales. Les calculs de flux d'azote ont été réalisés à l'aide du logiciel Excel.

2.4. Construction de scénarios de développement pour le futur

Sans tenir compte d'une quelconque notion de temporalité, cinq scénarios de développement ont été construits et étudiés en considérant une multiplication par trois de la SAU actuelle en AB, conduisant à environ 12 000ha de surface en AB, soit 30 % de la SAU (Tableau 2). Les données actuelles en AB sur le territoire sont issues de la base de données Agence BIO/OC regroupant les données des organismes certificateurs (Année 2021) avec environ 10 % des surfaces agricoles en AB.

Le premier scénario considéré comme le scénario « Tendanciel » (S1) consistait à multiplier la surface actuelle de chaque sous-catégorie de culture et chaque nombre d'animaux présent actuellement par trois (Tableaux 3 et 4), conduisant à des ratios cheptel par unité de surface identiques à ceux observés actuellement.

Tableau 2 : Description des scénarios d'expansion de l'AB étudiés en comparaison avec la situation actuelle.

	S1 Tendanciel	S2 Optimisation agronomique, zooteknique et technique	S3 Vers plus de protéines végétales	S4 Vers une production de protéines végétales et d'énergie	S5 Attentes territoriales
Surface	x3	x3	x3	x3	x3
Cheptel/surface					
- Ruminants	≈	≈	↓	↓	≈
- Monogastriques					↓
Prairies/surface	≈	≈	↓	↓	↓
Légumineuses	≈	≈	≈	↑↑	≈



fourragères/surface					
Légumineuses à graine/surface	≈	≈	↑↑	↑↑	↓
Maraichage/surface	≈	≈	≈	↓	↓
Efficiences & rendements					
Culture	≈	↑↑	≈	≈	↑
Animal					↓
Effluent					↑
Méthanisation/surface	≈	≈	≈	↑↑	≈

Le deuxième scénario appelé « Optimisation agronomique, zootechnique et technique » (S2) est similaire à S1 en termes de cultures et d'élevage mais en considérant plusieurs optimisations « réalistes » déterminées à dire d'expert et mises en œuvre dans le modèle à titre d'exemple. Une augmentation de la NCE et du rendement des cultures de 10 % a ainsi été prise en compte pour toutes les cultures et tous les animaux par rapport aux valeurs indiquées dans les tableaux précédents. De même, une diminution de toutes les pertes de 30 % a également été considérée par rapport aux valeurs indiquées dans les tableaux précédents. Bien que chaque optimisation se base sur une expertise réaliste, l'application de l'ensemble simultanément s'avère optimiste à court et moyen termes. Une étude plus poussée des optimisations possibles et des interactions entre les leviers mobilisés mériterait d'être conduite, notamment en intégrant les effets du changement climatique et les spécificités de l'AB.

Le troisième scénario intitulé « Vers plus de protéines végétales » (S3) est issu de travaux prospectifs réalisés sur l'agriculture incluant une évolution de l'alimentation humaine vers plus de produits végétaux (Billen *et al.* 2021, Poux et Aubert 2018, Couturier *et al.*, 2016). Ainsi, le ratio cheptel/surface a diminué de 40 % pour toutes les catégories d'animaux par rapport à S1 et S2. En conséquence, les surfaces en prairies (hors prairies permanentes) et fourragères et les surfaces en céréales et oléagineux ont été réduites de 40 %. Ces surfaces libérées ont été dédiées à la culture de légumineuses à graines, sans prise en compte, à ce stade, d'éventuelles contraintes agronomiques qui mériteraient d'être approfondies le cas échéant.

Les différences constatées entre toutes les prospectives globales existantes, notamment concernant le développement de la méthanisation, nous ont conduit à construire un quatrième scénario intitulé « Vers une production de protéines végétales et d'énergie » (S4) pour lequel la même réduction du cheptel que S3 a été appliquée. Comme dans le scénario S3, les surfaces en prairies et fourrages et en céréales et oléagineux ont également été réduites de 40 %, ce qui a permis de consacrer plus de surface aux légumineuses à graines. Mais le ratio de surface en légumes et fruits a également été réduit en considérant que les terres agricoles du territoire propices à ces cultures sont déjà largement utilisées et que la production est déjà élevée, ce qui a permis d'augmenter significativement la surface en luzerne. Ainsi, l'excédent de fourrage par rapport aux besoins des animaux a été utilisé comme matière première pour la méthanisation, en plus du fumier. Les digestats sont utilisés pour la fertilisation des cultures.

Enfin, un cinquième scénario appelé « Attentes territoriales » (S5) a été construit avec les acteurs de l'AB du territoire pour répondre à leurs attentes. Les acteurs de l'AB souhaitaient utiliser les atouts du territoire pour la production laitière et, ensuite, conserver le ratio de ruminants équivalent à S1 et S2 tout en diminuant le ratio de monogastriques comme S3 et S4. L'élevage de vaches laitières considéré dans ce scénario est encore plus extensif que dans les autres scénarios avec moins de maïs et de concentré et plus d'herbe conduisant à une augmentation de la surface en prairie et à une diminution de la surface en maïs fourrager. Ils ont également proposé de conserver la surface actuelle en légumes et



fruits, conduisant à baisser le ratio par unité de surface, étant donné que ce secteur est déjà bien développé. Les surfaces libérées ont été dédiées aux légumineuses à graines. Enfin, ils ont proposé des optimisations techniques pour la gestion des effluents (couverture des fosses de stockage de lisier, matériel d'épandage limitant les émissions et analyse des sols pour raisonner les apports) permettant de diminuer les pertes (réduction de 10 % pour la lixiviation et la dénitrification, réduction de 20 % pour les pertes au bâtiment et stockage et de 50 % à l'épandage).

Tableau 3 : Description des assolements du territoire en AB (ha) actuellement et pour les scénarios prospectifs étudiés

10	Sous-catégories	Actuel	S1	S2	S3	S4	S5
Prairies et fourrages	Prairies permanentes	515	1546	1546	1546	1546	1546
	Prairies temporaires	1775	5326	5326	3196	3196	6400
	Autres prairies	158	473	473	284	284	473
	Trèfles	0	0	0	0	0	0
	Luzerne	15	44	44	44	968	44
	Maïs ensilage	130	389	389	194	194	117
	Mélanges fourragés	188	563	563	338	338	169
	Autres fourrages	20	59	59	59	59	18
	Mélanges légumineuse et céréale	42	125	125	125	125	125
Fruits et légumes	Fruits à coque	0	0	0	0	0	0
	Fruits à pépins	17	51	51	51	26	17
	Autres fruits	2	7	7	7	3	2
	Baies	1	2	2	2	1	1
	Chou	144	433	433	433	216	144
	Légumes à feuille	3	8	8	8	4	3
	Légumes à fruit	85	256	256	256	128	85
	Légumes racines	1	2	2	2	1	1
	Légumes à tige	201	604	604	604	302	201
	Autres légumes	154	463	463	463	231	154
Autres cultures	Blé	89	266	266	159	159	266
	Légumineuses à graine	15	45	45	3252	3252	897
	Maïs	64	192	192	115	115	192
	Orge	71	212	212	127	127	212
	Sarrasin	18	55	55	33	33	55
	Triticale	34	101	101	61	61	101
		64	191	191	115	115	191



	Mélanges céréaliers	46	137	137	82	82	137
	Autres céréales	5	16	16	10	10	16
	Oléagineux	8	23	23	23	12	23
	Autres						
Non cultivé	-	91	272	272	272	272	272
TOTAL	-	3954	11862	11862	11862	11862	11862

Tableau 4 : Description des animaux d'élevage du territoire en AB actuellement et pour les scénarios prospectifs étudiés

Catégories	Sous-catégories	Actuel	S1	S2	S3	S4	S5
Ruminants	Vaches laitières	1408	4224	4224	2534	2534	4224
	Génisses laitières > 1an	617	1850	1850	1110	1110	1850
	Vaches allaitantes	211	633	633	380	380	633
	Génisses allaitantes > 1 an						
	Génisses < 1an	127	382	382	229	229	382
	Mâles	426	1277	1277	766	766	1277
	Veaux	157	471	471	282	282	471
	Brebis laitières	89	268	268	161	161	268
	Brebis allaitantes	79	237	237	142	142	237
	Ovins < 1 an	365	795	795	477	477	795
	Autres ovins	52	156	156	94	94	156
	Chèvres	75	225	225	135	135	225
	Chèvres < 1an	153	459	459	275	275	459
	Autres caprins	50	149	149	89	89	149
		11	32	32	19	19	32
Monogastriques	Truies	112	336	336	202	202	202
	Porcs	2240	6720	6720	4032	4032	4032
	Poules pondeuses	12150	36450	36450	21870	21870	21870
	Poulettes	14347	43040	43040	25824	25824	25824
	Poulet	28730	86189	86189	51713	51713	51713

Exprimé en nombre d'animaux s'ils sont présents toute l'année ou sinon nombre d'animaux produits sur l'année

2.5. Indicateurs

Pour l'évaluation et la comparaison des scénarios étudiés, nous avons défini huit indicateurs permettant de caractériser les flux d'N et couvrant les dimensions d'autonomie, de productivité et de circularité de l'N :



- autonomie totale en N (A_{Nt}) en % avec $A_{Nt} = (Atm_N + BNF) / (Atm_N + BNF + Imp_{N_feed} + Imp_{N_organic}) \times 100$;
- autonomie en N pour l'alimentation animale (A_{Naa}) en % avec $A_{Naa} = (1 - Imp_{N_feed}) / (Feed_{N_rum} + Feed_{N_mono}) \times 100$;
- productivité N surfacique (N_{out}) en $kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ avec $N_{out} = (Exp_{N_anim} + Exp_{N_plant} + Exp_{N_vege} + Exp_{N_manure}) / SAU(ha)$;
- besoin N surfacique (N_{in}) en $kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ avec $N_{in} = (Atm_N + BNF + Imp_{N_feed} + Imp_{N_organic}) / SAU(ha)$;
- efficience globale en N (NUE) en % avec $NUE = N_{out} / N_{in} \times 100$;
- pertes d'azote surfacique (N_{loss}) en $kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ avec $N_{loss} = (Lix_N + Denit_N + N_{NH3_spr} + N_{NH3_st\&p} + N_{NH3_bu}) / SAU(ha)$;
- taux moyen d'N fixé (N_{fix}) en $kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ avec $N_{fix} = BNF / SAU(ha)$;
- indice de circularité de l'azote (N_{circ}) ;

avec $N_{circ} = (Feed_{N_rum} + Feed_{N_mono} + Manure_{N_build}) / (Feed_{N_rum} + Feed_{N_mono} + Manure_{N_build} + N_{in} + N_{out} + N_{loss})$.

3. Résultats

L'application de la méthodologie présentée ci-dessus nous a permis de calculer l'ensemble des flux d'N pour les cinq scénarios de développement de l'AB étudiés (Figure 1 et 2) et les indicateurs associés (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des indicateurs pour les 5 scénarios considérés

Indicateurs	S1 « Tendanciel »	S2 Optimisation agronomique , zootechnique et technique	S3 Vers plus de protéines végétales	S4 Vers production de protéines végétales d'énergie	S5 Attentes territoriales
A_{Nt} (%)	58.4	68.9	58.6	84.0	81.1
A_{Naa} (%)	93.1	100	100	100	100
NUE (%)	37.5	45.8	48.2	40.6	39.6
N_{fix} ($kgN.ha^{-1}.an^{-1}$)	36.1	39.7	39.1	55.4	43.8
N_{in} ($kgN.ha^{-1}.an^{-1}$)	78.9	72	83.9	80.7	66.3
N_{out} ($kgN.ha^{-1}.an^{-1}$)	29.6	33	40.4	32.8	26.3
N_{loss} ($kgN.ha^{-1}.an^{-1}$)	49.3	39	43.4	48	40.1
N_{circ}	0.49	0.53	0.40	0.41	0.55

Pour le scénario « tendanciel » (S1), la fixation symbiotique égale à $36,1 kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ est le principal apport d'azote au système, mais ce système reste fortement dépendant des importations notamment d'engrais organiques, qui représentent le deuxième apport. Son A_{Nt} a été estimé à 58,4 % tandis que son A_{Naa} était plus élevée et égale à 93,1 %. L'azote exporté hors du système a été estimé à $29,6 kgN.ha^{-1}.an^{-1}$ principalement sous forme de produits animaux (56 %). Le NUE du système a été estimé



à 37,5 %, un peu inférieur à la valeur de 43 % estimée par Vergely *et al.* (2024) à l'échelle nationale pour l'AB. Cependant, cette NUE inférieure pourrait être due à la spécialisation du territoire étudié en élevage entraînant des pertes plus élevées estimées à 49,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. Par conséquent, les besoins surfaciques en N ont été estimés à 78,9 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. L'élevage favorise la circularité des nutriments, d'une part grâce à l'alimentation animale issue des cultures, et d'autre part par l'utilisation du fumier pour fertiliser ces mêmes cultures, avec un indice de circularité de 0,49.

L'« optimisation agronomique, zootechnique et technique » de tous les compartiments réalisés en S2 a permis d'augmenter N_{fix} à 39,7 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. L'augmentation du rendement des cultures et du NCE a permis d'augmenter N_{out} jusqu'à 33 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, avec un rapport animal/végétal équivalent à S1, ce qui, ajouté à la diminution de N_{loss} (39 kgN.ha⁻¹.an⁻¹), a entraîné une augmentation de la NUE atteignant 45,8 %, dépassant les données de Vergely *et al.* (2024). Par conséquent, les besoins en N estimés à 72 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ étaient inférieurs à S1 malgré une production plus élevée. De telles optimisations ont permis d'atteindre l'autonomie pour l'alimentation animale mais le A_{Nt} égal à 68,9 % est resté largement inférieur à 100. L'indice de circularité calculé (0,53) était plus élevé que pour S1 principalement en raison de la production plus élevée de fourrage et de cultures utilisés pour l'alimentation animale.

La diminution du cheptel animal et les changements associés dans la production des cultures pour aller « vers plus de protéines végétales » en S3 ont conduit à une diminution de N_{loss} par rapport à S1 avec 43,4 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ et à une augmentation de N_{out} jusqu'à 40,4 kgN.ha⁻¹.an⁻¹, avec une NUE résultante égale à 48,2 %, supérieure à S1 et S2. Concernant N_{fix} , l'augmentation de la culture des légumineuses à graines a conduit à une augmentation de N_{fix} mais elle a été partiellement compensée par une diminution des prairies, résultant en une valeur de 39,1 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ similaire à S2 et un peu plus élevée que S1. N_{out} a largement augmenté jusqu'à 40,4 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ avec une réduction importante de la part animale égale à 24 %. La réduction du cheptel a diminué la circularité (0,40) et a conduit à une augmentation de N_{in} égale à 83,9 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. Comme cette augmentation est peu compensée par l'augmentation de N_{fix} , le A_{Nt} égal à 58,6 % n'était que légèrement supérieure à S1 mais l'autonomie pour l'alimentation animale a été atteinte.

Pour S4 « vers une production de protéines végétales et d'énergie », une diminution du cheptel similaire à celle de S3 a été appliquée avec un changement similaire dans la production des cultures. Cependant, comme le ratio de surface légumes et fruits a également été réduit en faveur de la luzerne utilisée comme matière première pour la méthanisation, la circularité a légèrement augmenté (0,41) par rapport à S3 et N_{fix} a augmenté significativement jusqu'à 55,4 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. L'augmentation de la circularité mais surtout l'augmentation de la fixation ont ainsi permis d'atteindre une autonomie totale de 81 % et une autonomie en alimentation animale de 100 %. N_{out} était proche de S2 avec 32,8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ avec une part animale de 30 %. Mais N_{loss} était supérieure à S2 et S3 avec 48 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ notamment en raison de l'augmentation des émissions de NH₃ du digestat, conduisant à N_{in} égal à 80,7 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. La NUE résultant était de 40,6 %. Par ailleurs, bien que cela ne pas fait l'objet de cette étude et n'a donc pas été quantifié, il est important de souligner que ce scénario permet la production d'énergie sous forme de biogaz.

Le dernier scénario proposé par les acteurs du territoire « Attentes territoriales » (S5) a conduit également à une réduction du cheptel mais concernant uniquement le troupeau monogastrique tandis que le ratio d'herbe dans l'alimentation des ruminants augmente au détriment de l'ensilage de maïs et de concentré. L'augmentation résultante des surfaces herbagères et l'augmentation des surfaces de légumineuses à graines ont conduit à N_{fix} supérieur à S1, S2 et S3 avec 43,8 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. La mise en œuvre de mesures techniques pour optimiser l'utilisation du fumier contribue également à réduire les pertes avec N_{loss} égal à 40,1 kgN.ha⁻¹.an⁻¹. Une telle optimisation et la conservation de l'élevage de ruminants alimenté à l'herbe permettent d'augmenter la circularité jusqu'à 0,55 tout en maintenant une NUE de 39,6 %. Le compromis de ce scénario est la diminution de la production avec un N_{out} égal à



26,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹ avec une part animale de 58 %. Cette production inférieure par rapport aux autres scénarios a permis de réduire N_{in} (66,3 kgN.ha⁻¹.an⁻¹).

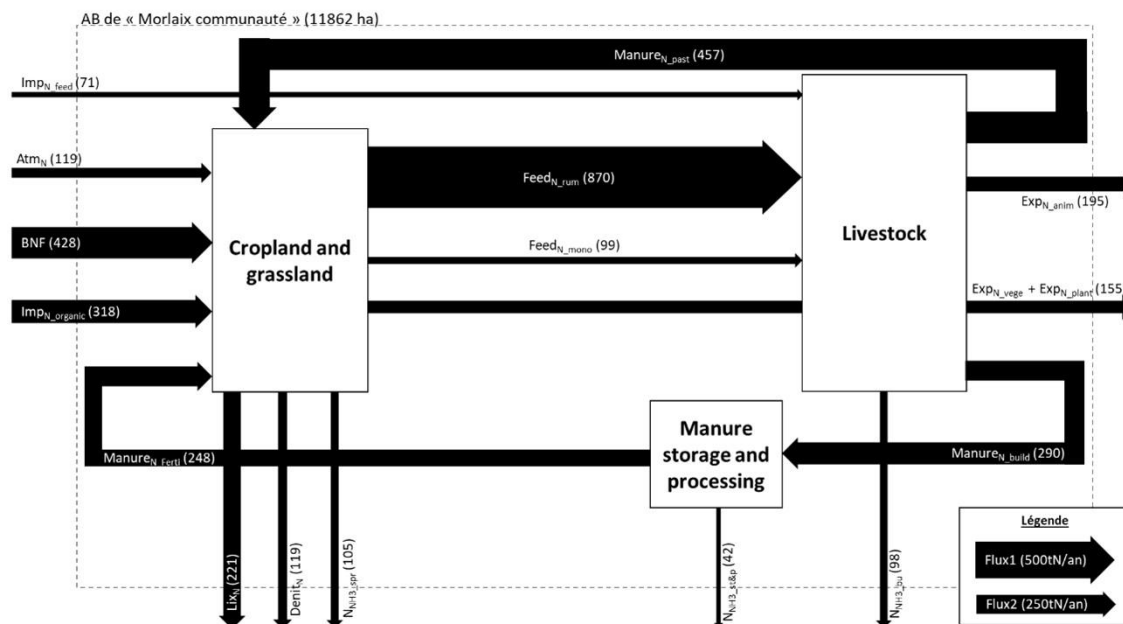


Figure 1 : Flux d'N estimés au sein de l'AB de Morlaix communauté pour le scénario « tendanciel » (S1).

4. Discussion

Les résultats présentés dans cet article illustrent différentes possibilités pour aller vers l'autonomie azotée en AB. De nombreux autres scénarios sont possibles en combinant les leviers pris en compte dans ce travail mais aussi d'autres leviers plus adaptés à d'autres contextes territoriaux. Ce travail n'a pas pour objectif d'apporter une solution précise mais plutôt de tracer des pistes de réflexion pour aller vers cette autonomie. Les résultats obtenus mettent ainsi en exergue quatre voies pour accroître l'autonomie. À partir d'une situation considérée comme tendanciel avec une autonomie de 58,4 %, deux des scénarios étudiés atteignent une autonomie supérieure à 80 %. À titre de comparaison, l'autonomie de l'agriculture française, principalement en AC, a été estimée à 21 % en 2013 (Harchaoui et Chatzimpiros, 2019).

La première voie pour accroître cette autonomie azotée est l'optimisation de tous les compartiments (animaux, effluents et cultures) comme illustrée par le scénario « Optimisation agronomique, zootechnique et technique » (S2). Un tel scénario a été réalisé en utilisant, à titre d'illustration, un cumul d'optimisations « réalistes » conduisant à des performances globales plutôt optimistes. Par conséquent, les résultats de ce scénario illustrent que, même en considérant des améliorations significatives des pratiques actuelles, l'optimisation de l'existant ne permet pas d'atteindre l'autonomie, l'augmentant seulement de 58,4 à 68,9 %. Ces résultats indiquent que l'optimisation des systèmes existants ne suffira pas pour tendre vers l'autonomie en AB et que des changements structurels seront nécessaires. De plus, si ces optimisations ne sont pas déjà mises en œuvre, c'est sans doute parce qu'elles ne correspondent pas aux stratégies des agriculteurs.

La deuxième voie pour atteindre l'autonomie azotée, souvent citée dans la littérature, est l'augmentation de la circularité au sein du territoire (Harder *et al.*, 2021). Cette voie est principalement illustrée par le scénario « Attentes territoriales » (S5) avec la circularité la plus élevée et permettant d'augmenter l'autonomie jusqu'à 81,1 %. Ce scénario qui repose en grande partie sur l'élevage extensif de vaches laitières nourries à l'herbe favorise la fixation de l'N et sa recirculation via le fumier de vache tout en



minimisant les pertes grâce à la part élevée de rejet directement lors du pâturage. Ce scénario illustre que la circularité peut également être un moyen d'augmenter l'autonomie bien que cela ne soit pas systématique. Par exemple, le scénario « Vers une production de protéines végétales et d'énergie » (S4) affiche une autonomie fortement augmentée malgré un indice de circularité plus faible. En revanche, le scénario S2 indique une augmentation de la circularité presque équivalente à celle du scénario S5 mais sans amélioration de son autonomie. Dans le cas S5, cette circularité accrue est obtenue au détriment de la productivité du territoire avec une baisse de N_{out} . Cette baisse de productivité peut être interprétée par le fait qu'une partie de la surface est partiellement dédiée à la production de fertilisation par les légumineuses dans les prairies via les ruminants, réduisant ainsi la surface productive réelle pour l'alimentation humaine.

Comme illustré dans S4, la circularité et l'optimisation de l'existant ne sont pas les seuls moyens d'augmenter l'autonomie. Une troisième voie consistant à modifier les productions avec, dans notre exemple, une réduction de l'élevage au bénéfice de la production d'énergie et de fertilité à travers la méthanisation qui permet également un gain d'autonomie allant dans notre cas jusqu'à 84 %. En effet, l'introduction de la méthanisation associée à la culture de légumineuses fourragères, comme la luzerne, pourrait aussi être un moyen d'augmenter l'autonomie du territoire. Dans ce cas, une partie des surfaces serait partiellement dédiée à la production de fertilisation par les légumineuses (la luzerne) et d'énergie. Cependant, la réduction du cheptel (ruminants et monogastriques) est partiellement compensée par le développement des légumineuses à graines permettant de conserver une bonne production par unité de surface. Le principal compromis de ce scénario est la hausse des pertes.

Enfin, la quatrième voie mise en évidence par ce travail est illustrée par le scénario S5 et concerne l'extensification globale du système. Ce scénario permet de développer les prairies grâce au maintien du cheptel de ruminants alimenté principalement à l'herbe, augmentant ainsi la fixation symbiotique du territoire et minimisant la concurrence de ressources avec l'alimentation humaine. Ce type d'alimentation des ruminants et la réduction des effectifs monogastriques conduisent cependant à une baisse de productivité du territoire. Toutefois, cela permet aussi de limiter les besoins surfaciques en N du territoire et les pertes vers l'environnement.

Les scénarios « Vers plus de protéines végétales » (S3), S4 et S5 ont mis en jeu une diminution du cheptel par rapport au scénario « tendanciel » (S1). Cependant, tous n'ont pas conduit à une augmentation significative de l'autonomie comme l'illustre S3 avec une autonomie équivalente à S1. Ces résultats mettent en évidence que la réduction du cheptel, et particulièrement des ruminants, induit une réduction des légumineuses fourragères et, même si cette réduction est en partie compensée par la culture des légumineuses à graines, le gain d'autonomie est faible. En effet, dans le cas des légumineuses à graines, l'azote utilisé par la culture est en partie fixé mais la majeure partie est exportée et quasiment rien n'est restitué pour la culture suivante contrairement aux légumineuses fourragères pour lesquelles une partie importante est restituée sous forme de fumier ou de digestat.

L'ensemble de ces résultats montrent que l'usage de terres agricoles partiellement dédiées à la production de fertilisants organiques s'avère un levier incontournable pour atteindre l'autonomie en azote mais engendre, en contrepartie, une réduction de la productivité surfacique du territoire. Pour assurer une production suffisante de protéines pour l'alimentation humaine, cette baisse de productivité peut être compensée par une utilisation plus directe par l'homme des protéines produites (réduction de l'élevage au bénéfice de cultures consommables par l'humain telles que les légumineuses à graines) et/ou par une maximisation du retour au sol de l'azote des fourrages (extensification de la production animale, méthanisation). Ces compromis sont à étudier en fonction des caractéristiques des territoires.

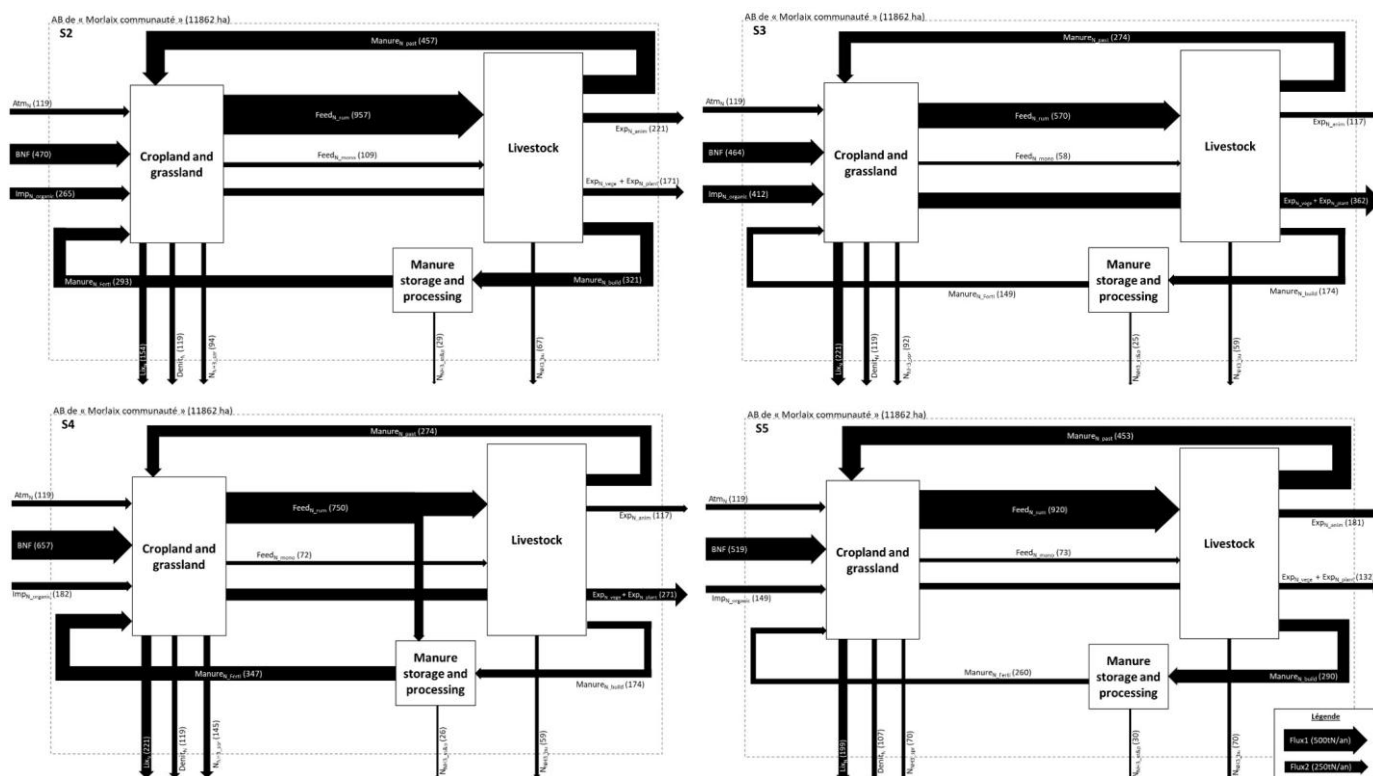


Figure 2 : Flux d'N estimés au sein de l'AB de Morlaix communauté des 4 scénarios considérés : S2 : Optimisation agronomique, zootechnique et technique, S3 : Vers plus de protéines végétales, S4 : Vers une production de protéines végétales et d'énergie, S5 : Attentes territoriales.

D'autres leviers cités dans la littérature, notamment l'usage des déchets du territoire (déchets verts & biodéchets) mais également le recyclage des excréments humains et plus particulièrement des urines, n'ont pas été mobilisés dans cette étude et mériteraient une attention particulière. Cependant, ils n'ont pas été mobilisés car dans les territoires ruraux tel que Morlaix Communauté, les flux mobilisables de biomasses de ce type sont restreints et ont été estimés à moins de 5kgN.ha⁻¹an⁻¹ (déchets verts & biodéchets). Ils ne permettent donc pas d'envisager une augmentation importante de l'autonomie du territoire (<3 %).

Au sein des scénarios testés, aucun ne permet d'atteindre l'autonomie complète de l'AB sur le territoire mais certains permettent toutefois d'atteindre plus de 80 % d'autonomie, montrant ainsi que cette autonomie n'est probablement pas un mythe mais elle nécessitera toutefois une mobilisation de tous les leviers disponibles et adaptés aux territoires en fonction de ses atouts biophysiques mais aussi de ces dynamiques d'acteurs.

5. Conclusions

Dans un scénario d'expansion de l'AB de 10 à 30 % de la SAU et dans sa configuration actuelle, l'autonomie azotée de l'AB sur le territoire de Morlaix communauté semble bel et bien un mythe et une optimisation technico-agronomique poussée ne suffira pas à l'atteindre. Cependant, des changements structurels permettent d'envisager cette autonomie comme une réalité. Ainsi, une extensification plus poussée du système agricole AB, notamment de l'élevage, et adaptée au territoire semble être un levier important pour atteindre cette autonomie. Cette extensification permet de dédier une partie des terres productives à la production de fertilisation à travers la culture de légumineuses fourragères qui peuvent être transformées par les ruminants et/ou la méthanisation, en fertilisant, d'une part, et en produits animaux et/ou énergie, d'autre part. Ces résultats montrent également que la réduction du cheptel



animal seule, notamment des ruminants, ne conduit pas à une augmentation importante de l'autonomie car elle réduit la circularité des flux. Elle doit donc être combinée à une extensification et/ou à des modifications d'usage des légumineuses fourragères (en méthanisation par exemple) pour favoriser cette autonomie. À ce titre et au-delà des usages en méthanisation, une utilisation directe de ces légumineuses comme fertilisant pourrait être envisagée. Dans ce contexte, le rôle des monogastriques dans l'autonomie des territoires mériterait un approfondissement, notamment pour leur capacité à recycler des coproduits et des résidus. De plus, les scénarios envisagés dans cette étude ne sont pas exclusifs les uns des autres et l'outil développé offre la possibilité d'explorer d'autres scénarios et d'évaluer différents territoires. Au-delà de N, se pose également le problème de la fertilité vis-à-vis du de l'élément phosphore et, dans ce cas, aucun processus « naturel » ne pourra compenser le manque de recyclage. Il semble donc nécessaire d'intégrer cette problématique dans l'étude des flux et la recherche d'autonomie des territoires.

Il est également important de noter que les changements structurels modélisés à l'échelle de la production agricole nécessitent des changements structurels au sein des filières agroalimentaires ainsi que dans nos régimes alimentaires. Pour cela, des politiques publiques globales, cohérentes et coordonnées sont indispensables.

Au-delà des résultats chiffrés, il convient de souligner que ce travail a permis une appropriation de cette problématique de carence en N par les acteurs du territoire, qui n'en avaient pas pleinement conscience en début de projet. Bien que leurs préoccupations majeures demeurent légitimement centrées sur des enjeux à plus court terme (équilibre économique, accessibilité aux terres, ...), cette méthodologie a permis à ces acteurs de se projeter vers l'avenir et d'envisager l'expansion de l'AB. De plus, elle leur a offert l'opportunité de s'approprier les leviers proposés dans la littérature scientifique.

L'approche développée lors de cette étude focalisée sur l'autonomie en N est différente et complémentaire des approches classiques d'évaluation environnementale. Elle permet de s'affranchir des approches multicritères souvent complexes en termes méthodologiques et d'appropriation des résultats en faisant l'hypothèse qu'un écosystème est en capacité d'absorber ce qu'il produit de manière autonome et donc de maintenir sa capacité productive. Toutefois, pour consolider ce type d'approche, il apparaît nécessaire de l'élargir à l'élément P comme mentionné ci-dessus, mais également à l'énergie.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Fabrice BELINE : <https://orcid.org/0000-0003-1885-1842>

Souhil HARCHAOU : <https://orcid.org/0000-0002-6407-8291>



Contributions des auteurs

Fabrice Beline : rédaction de l'article

Marylou Blondel, Sara Larcher et Antoine Boutier : collecte de données et développement de l'outil de calcul

Niels Bize : coordination du projet, relecture de l'article

Souhil Harchaoui : coordination du projet, relecture de l'article

Aurélie Wilfart, Fanny Vergely : participation aux ateliers de construction de scénarios et relecture de l'article

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Observatoire du Développement Rural (US-ODR) INRAE Occitanie-Toulouse pour l'accès aux données de la base de données Agence BIO/OC ainsi que tous les acteurs ayant participé au projet et plus particulièrement Yann Evenat et Paul Salaün.

Déclaration de soutien financier

Les résultats présentés dans cet article sont issus du projet CirculAB financé par le conseil Régional de Bretagne dans le cadre de l'appel à projet "Recherche et société 2021" et des projets intAB et Organic4organic financés par INRAE dans le cadre du Métaprogramme METABIO.

Références bibliographiques

Barbieri P., Pellerin S., Seufert V., Smith L., Ramankutty N., Nesme T., 2021. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food*, 2 (5), pp. 363 - 372, DOI: 10.1038/s43016-021-00276-y

Barbieri P., Starck T., Voisin A.-S., Nesme T., 2023. Biological nitrogen fixation of legumes crops under organic farming as driven by cropping management: A review. *Agricultural Systems*, 205, art. no. 103579, DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103579

Beline F., 2025. Références techniques pour la modélisation des flux d'azote en système de polyculture-élevage en agriculture biologique. <https://doi.org/10.57745/APHEOJ>

Benoit M., 2014. Les fuites d'azote en grandes cultures céréalières : Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine (France). *Sciences de la Terre*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, France.

Billen G., Aguilera E., Einarsson R., Garnier J., Gingrich S., Grizzetti B., Lassaletta L., Le Noë J., Sanz-Cobena A., 2021. Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), 839-850.

Couturier, C., Charru, M., Doublet, S., Pointereau, P., 2016. AFTERRES 2050. Le scénario AFTERRES 2050 version 2016, SOLAGRO, 1-96.

De Ponti, T., Rijk, B., Van Ittersum, M.K., 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agric. Syst.* 108, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.12.004>.

DRAAF, 2020. <https://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/les-fiches-territoriales-special-recensement-agricole-2020-des-epci-bretons-a2644.html#Finistere>



Harchaoui S., Chatzimpiros P. 2019. Energy, nitrogen, and farm surplus transitions in agriculture from historical data modeling. France, 1882–2013. *J. Ind. Ecol.* 23, 412–425.

Harder R., Giampietro M., Mullinix K., Smukler S. 2021. Assessing the circularity of nutrient flows related to the food system in the Okanagan bioregion, BC Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, art. no. 105842, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105842.

Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2023. L'agriculture Biologique, Chiffres 2023. <https://agriculture.gouv.fr/infographie-lagriculture-biologique> (consulté le 9/12/2024).

Muller A., Schader C., El-Hage Scialabba N., Brüggemann J., Isensee A., Erb K-H., Smith P., Klocke P., Leiber F., Stolze M., Niggli U., 2017. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun*, 8, 1290.

Observatoire de la production biologique en Bretagne, 2021. Les publications du réseau GAB-FRAB.

Ponisio, L.C., M'Gonigle, L.K., Mace, K.C., Palomino, J., de Valpine, P., Kremen, C., 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 282, 20141396. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1396>.

Poux X., Aubert P. M., 2018. An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-AScA, Study, 9, 18.

Reimer, M., Oelofse, M., Müller-Stöver, D., Möller, K., Bünemann, E.K., Bianchi, S., Vetemaa, A., Drexler, D., Trugly, B., Raskin, B., Blogg, H., Rasmussen, A., Verrastro, V., Magid, J., 2024. Sustainable growth of organic farming in the EU requires a rethink of nutrient supply. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 129, 299-315, <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10297-7>

Ronceux A. & Favrelière E., 2017. Gestion de l'azote en Agriculture Biologique. Fiches thématiques issues du projet Agri-Bio : de la connaissance à la performance. Agri-Transfert.

Seufert, V., Ramankutty, N., Foley, J.A., 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485, 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature11069>.

Smith, L.G., Jones, P.J., Kirk, G.J.D., Pearce, B.D., Williams Adrian, G., 2018. Modelling the production impacts of a widespread conversion to organic agriculture in England and Wales. *Land Use Policy* 76, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.035>.

Starck T., Fardet T., Esculier F., 2024. Fate of nitrogen in French human excreta: Current waste and agronomic opportunities for the future, *Science of the Total Environment*, 912, art. no. 168978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168978

Vergely F., Wilfart A., Aubin J., Harchaoui S., 2024. Contribution of livestock to organic agriculture: Modelling nitrogen flows at the national scale, *Resources, Conservation and Recycling*, 208, art. no. 107726. DOI: 10.1016/j.resconrec.2024.107726

Vertès F., Jeuffroy M.H., Louarn G., Voisin A.S., Justes E., 2015. Légumineuses et prairies temporaires : des fournitures d'azote pour les rotations. Journées AFPF, La fertilité des sols dans les systèmes fourragers - 8-9 Avril 2015.

Pour citer cet article : Fabrice Beline, Marylou Blondel, Sara Larcher, Niels Bize, Antoine Boutier, et al.. Vers l'autonomie azotée en agriculture biologique : une étude de cas théorique sur un territoire français. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.14-30. [10.17180/ciag-2025-vol106-art02](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art02)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



Evolution et gestion de la fertilité des sols d'un système bovins viande autonome en agriculture biologique

Bertrand DAVEAU¹

¹ Chambre d'agriculture des Pays de la Loire

Correspondance : bertrand.daveau@pl.chambagri.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art03>

Résumé

L'absence de fertilisation minérale de synthèse et plus globalement le faible recours à des intrants interrogent sur la capacité des systèmes conduits en agriculture biologique à maintenir la fertilité de leurs sols sur le long terme. Cependant dans le cas de la polyculture-élevage de ruminant, la large place accordée aux prairies dans ces systèmes constitue une hypothèse favorable au maintien voire à l'amélioration de cette fertilité qu'il s'agit d'objectiver. L'évolution des principaux indicateurs de fertilité chimique des sols, d'un système allaitant herbager autonome et économe conduit en agriculture biologique depuis 25 ans est analysé. La large place accordée aux prairies temporaires riches en légumineuses dans la rotation, couplée à des exportations modérées en production allaitante sont bien des facteurs favorables au maintien de la fertilité. L'étude montre même des trajectoires très encourageantes d'accroissements des taux de matières organiques des sols y compris sur les parcelles en rotation. Les perspectives d'exploration d'autres composantes de la fertilité notamment biologique, de stockage de carbone ou encore d'équilibre agronomique entre surface dédiée à l'élevage et aux cultures exportées sont enfin discutées.

Mots-clés : polyculture-élevage, légumineuses, matières organiques, prairies, rotation

Abstract: Soil fertility development and management in a self-sufficient organic beef cattle farming system.

The absence of synthetic mineral fertilization and, more generally, the low use of inputs raise questions about the ability of organic farming systems to maintain soil fertility over the long term. However, in the case of mixed farming systems, the large proportion of grassland in these systems constitutes a favorable hypothesis for maintaining or even improving this fertility, which needs to be proven. The evolution of the main indicators of chemical soil fertility in a self-sufficient beef farming system based on suckler cows and grassland fed animals that has been managed organically for 25 years is analyzed. The large role played by legume-rich temporary grassland in the rotation, coupled with moderate exports in beef farming, are indeed factors conducive to maintaining fertility. The study shows very encouraging trajectories for increasing soil organic matter levels, including on rotational plots. Finally, the prospects for exploring other components of fertility, in particular biological, carbon storage and agronomic balance between areas dedicated to livestock production and export crops, are discussed.

Keywords: mixed farming, legumes, organic matter, grasslands, crop rotation

1. Constats et contexte

1.1. Des interrogations sur le maintien de la fertilité en agriculture biologique

L'absence d'une fertilisation minérale de synthèse dans les systèmes en agriculture biologique interroge sur la capacité à maintenir la fertilité chimique des sols. Cette interrogation est particulièrement



présente dans les systèmes de grandes cultures conduits en agriculture biologique (Fontaine *et al*, 2019). Dans un essai rotation en grandes cultures biologiques conduit dans la Drome sur douze ans comparant l'utilisation d'engrais organiques avec ou sans phosphore (rotation iso apport d'azote organique), Arvalis (Vericel *et al*, 2018) a conclu à une baisse de la teneur en phosphore Olsen du sol de la rotation sans apport de phosphore. Des écarts significatifs ont été observés à la baisse sur la productivité des céréales (blé et maïs) pour la rotation sans apport de phosphore.

Ces interrogations sont moins présentes dans les systèmes d'élevage de ruminants conduit en agriculture biologique. Les niveaux d'exportation par unité de surface pour les principaux minéraux majeurs sont moins élevés sur les hectares valorisés par les ateliers animaux. Les restitutions au pâturage et de matières organiques plus fréquents permettent également de maintenir plus facilement un équilibre.

A l'échelle du système, l'approche bilan des minéraux permet d'établir un premier diagnostic du flux et du solde de trois minéraux majeurs : l'azote N, le phosphore P, le potassium K. Les bilans des minéraux effectués sur les principaux systèmes de bovins allaitant en AB, très spécialisés (pas de cultures de vente) des Pays de la Loire (Réseau d'élevage viande, 2020) montre un solde légèrement excédentaire en azote (+ 20 à 40 UdN/ha/an) lié à la prise en compte de la fixation symbiotique par les légumineuses. Le solde est également très légèrement positif pour le potassium (+ 4 à 13 U d'U de K2O). Il s'explique par la très faible part de cultures de ventes et donc un recours à l'achat extérieur de paille qui contribue à une entrée significative de potassium. Sur le phosphore, le bilan est très légèrement déficitaire (de 0 à - 3 U de P2O5/ha/an).

1.2. Un focus particulier sur la question du phosphore

Sur ces systèmes d'élevage de ruminants, les bilans des minéraux montrent donc des soldes en général très légèrement déficitaires en phosphore. La question de l'évolution des teneurs en phosphore du sol sur le long terme peut donc être posée. Par ailleurs, le phosphore a la particularité d'avoir des mécanismes de solubilité dans le sol et donc d'assimilation pour la plante encore mal connus (Plassard *et al*, 2015). Des études antérieures sur prairies ont d'ailleurs montré que les analyses foliaires (dosage de P et K dans le couvert) avec des calculs d'indice de nutrition étaient plus à même de rendre compte du réel statut de nutrition phospho-potassique du couvert végétal qu'un dosage du phosphore du sol, en particulier pour des prairies de plus de 2 ans (Jouany *et al*, 2005).

1.3. Les matières organiques et la mise à disposition d'azote

Les bilans des minéraux effectués sur ces systèmes d'élevage viande de la région conduisent à des soldes légèrement excédentaires en azote. Cet excédent est obtenu grâce à la contribution des légumineuses. Il ne permet cependant pas de rendre compte de la mise à disposition de l'azote pour la culture en place, en particulier au printemps, pendant la phase de croissance maximale du couvert. Cette quantité d'azote mise à disposition ne peut être évaluée qu'en prenant en compte la minéralisation. Cette minéralisation fournit une quantité d'azote (et autres éléments), qui dépend de l'activité biologique du sol s'attaquant au stock de matière organique stable. Des facteurs comme le travail du sol, le type de matière organique utilisé vont influencer la biodégradabilité de cette matière organique. Si les analyses de sol « classiques » peuvent renseigner sur les évolutions de la teneur en matière organique des sols, ces dernières n'apportent pas d'information sur l'évolution des différents compartiments de cette matière organique avec un impact potentiel sur la mise à disposition d'azote et plus globalement sur l'activité biologique.



2. Problématique et objectif de l'étude

Dans les systèmes d'élevage bovins autonomes, l'autonomie alimentaire complète et la très faible utilisation d'intrants conduisent à une quasi-absence de flux d'intrants au système malgré des sorties sous forme de produits animaux (lait ou viande) et de grains (suivant le degré de spécialisation). Ainsi, des interrogations se posent sur la capacité de maintenir la fertilité des sols sur le long terme.

En s'appuyant sur une analyse approfondie de l'évolution de la fertilité chimique des sols d'un système très autonome conduit en agriculture biologique depuis 25 ans, cette étude a pour objectif :

- d'étudier l'évolution des principaux éléments nutritifs du sol ;
- d'identifier d'éventuels facteurs limitants et mesurer son impact éventuel ;
- de mesurer l'évolution des matières organiques sur le long terme.

Une connaissance plus fine de ces éléments pourrait permettre :

- de lever d'éventuels freins à la conversion en mettant en avant la capacité d'un système de polyculture élevage cohérent à obtenir un cycle vertueux des principaux éléments majeurs de la fertilité ;
- d'initier des réflexions sur les possibilités offertes par la rotation, les pratiques agronomiques et plus globalement la polyculture/élevage pour accumuler de la matière organique, accroître l'activité biologique du sol et assurer la durabilité des systèmes d'élevage conduit en agriculture biologique.

3. Matériel et méthodes

3.1. Contexte de la ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou

Située à 20 km au Nord-Ouest d'Angers, la ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou développe un système allaitant de type naisseur-engraisseur de bœufs conduit en agriculture biologique depuis près de 25 ans. À la création du site, trois postulats majeurs ont été posés i) l'autonomie alimentaire complète du troupeau ii) une exigence élevée sur les performances zootechniques avec la finition de la quasi-totalité des bovins et iii) une sobriété forte vis-à-vis des intrants. La ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou est située dans une zone pédoclimatique contraignante. Les sols limoneux-sableux (faibles teneurs en argile), à tendance acide, de faibles profondeurs (50 cm en moyenne) et chargés en cailloux disposent d'une réserve hydrique limitée. Près de la moitié des parcelles est qualifiée en faible potentiel en disposant d'à peine 50 mm de réserve utile en eau. Les questions du maintien de la fertilité des sols fait partie intégrante des réflexions pour le pilotage stratégique et opérationnel du système agronomique.

3.2. Description du système et de la rotation

Sur 140 ha de SAU, la majorité de la surface est consacrée à la production de ressources alimentaires pour les 130 UGB du troupeau. Les cultures de vente représentent en effet moins de 5 % de la SAU. La surface fourragère représente 85 % de la surface avec un chargement de 1,10 UGB/ha de SFP. 50 ha sont en prairie permanente. Sur les 90 ha, la rotation principale s'appuie sur des prairies temporaires pendant 4 ans. Une association de triticale/pois fourrager est ensuite récoltée en grains suivie d'un colza fourrager pâturé avant le semis de féverole. En 7^{ème} année de rotation, l'implantation des prairies est réalisée sous couvert de céréales-protéagineux à dominante céréale (triticale 250grains/m², pois fourrager 15g/m², vesce 15 g/m²). Le recours au labour est systématique pour la destruction des prairies et le semis de féverole. Il est optionnel (suivant le salissement de la parcelle) pour l'implantation des prairies. En termes de gestion de la fertilisation organique, la majorité des



effluents d'élevage (fumier de bovins pailleux) est compostée. Cependant, sur ce système pâturant avec un temps de présence en bâtiment limité, la production de compost reste faible et conduit à un apport moyen de seulement de 3 à 3,5 t brute de compost/ha/an

3.3. Bilan des minéraux

La méthodologie de calcul s'appuie sur des travaux initiés depuis de nombreuses années (Simon *et al*, 1992) et largement utilisé et diffusé par l'institut de l'élevage dans le cadre des approches systèmes d'élevage (Réseau INOSYS). L'approche somme les flux de matières entrantes dans le système (quantité x teneur en N, P, K) auxquels sont retirés les flux sortants (quantité x teneur N, P, K). Le solde est exprimé par hectare.

3.4. Base de données sol

30 parcelles de la ferme expérimentale disposent d'une caractérisation physique précise. Les informations de granulométrie (% limons, % sables, % argile) ainsi que la profondeur et le pourcentage de charge grossière sont disponibles. 19 d'entre elles sont cultivées depuis la création de la ferme. Ces parcelles disposent d'analyses chimiques (MO, N, P, K, CaO, MgO, pH, CEC...) régulières grâce à 5 campagnes d'analyse (2004, 2008, 2014, 2019, 2023). Il s'agit pour la plupart d'entre elles de parcelles entrant dans la rotation (prairie temporaire sur 4 à 5 ans suivie de 3 années de cultures annuelles).

Les prélèvements sont réalisés sur l'horizon 0-30 cm avec une dizaine de prélèvements en milieu de parcelle. L'analyse porte principalement sur les parcelles disposant d'une plus forte historicité notamment sur 14 parcelles en rotation depuis 2004.

Tableau 1 : Données mobilisées

Analyses	Type de parcelle	Années
Bilan des minéraux	Échelle système : flux entrants et sortants moyens	de 2018 à 2022
TENEURS du SOL en N, P, K, CaO, MgO, pH	Focus sur 14 parcelles en rotation (sans prairie permanentes).	2004, 2008, 2014, 2019, 2023
Teneurs en Matières organiques	Ensemble des parcelles analysées (avec prairies permanentes) Focus trajectoire des 14 parcelles en rotation (sans prairies permanentes)	2008, 2014, 2019, 2023
FRACTURATION de la matière organique	7 parcelles : 4 parcelles en rotation 3 prairies permanentes	2023

3.5. Focus sur le phosphore

L'analyse est réalisée sur des pools de fourrages de nature et de cycle d'exploitation similaire. Le potentiel de données mobilisées depuis 25 ans est de 400 analyses.

Les principales informations mobilisées sont : l'âge de la parcelle, la date de récolte, le rendement, le pourcentage de légumineuses, la teneur en MAT, la teneur en phosphore. Cette étape s'attache à caractériser l'évolution des teneurs en phosphore de ces stocks fourragers par catégorie.

A partir de la base de données sol, les corrélations entre phosphore du sol et teneurs en phosphore des fourrages sont étudiées.

3.6. Evolution des matières organiques

Pour mieux comprendre le lien entre pratiques agronomiques et teneur en matière organique, les dynamiques d'évolution de la teneur en matière organique du sol sur 20 ans sont analysés. Pour affiner



les analyses précédentes, l'objectif est d'étudier plus précisément l'incidence de la rotation et du travail du sol sur l'évolution de la teneur en matière organique et sa compartimentation (stable vs labile). La matière organique peut être dissociée en 2 fractions : une fraction stable constituée de matière organique évoluée dite stable qui apporte principalement des propriétés physiques au sol (porosité, rétention d'eau, réduction de la battance...) ; une fraction labile (ou libre) constituée de matière organique plus « jeune » apportant principalement les nutriments (carbone et azote) aux microorganismes du sol. La compartimentation des deux fractions s'effectue par granulométrie : les matières organiques > 50 µm (grosses particules) constituent les matières organiques libres ; les matières organiques < 50 µm (particules plus petites) constituent les matières organiques stables.

4. Résultats

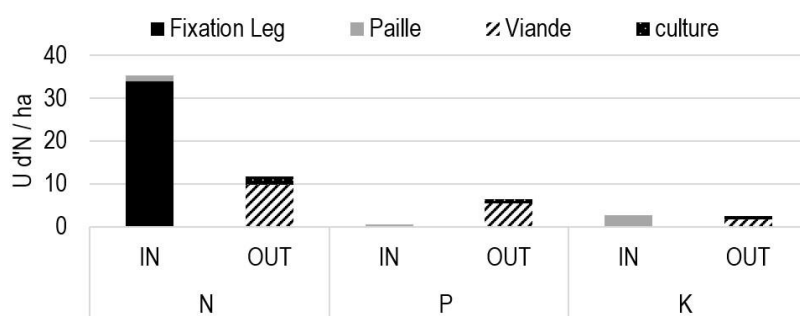


Figure 1 : Bilan des minéraux

4.1. Bilan des minéraux

Le système est considéré comme une « boîte noire ». Seuls les flux d'entrées (IN) et de sorties (OUT) sont pris en comptes (figure 1). La paille achetée permet une très légère entrée d'azote et de phosphore et une proportion un peu plus significative de potassium. L'entrée exogène principale d'azote est permise par la fixation d'azote des bactéries symbiotiques des légumineuses. La majorité des sorties sur le système est réalisée sous forme de viande bovine, viennent ensuite les ventes de céréales.

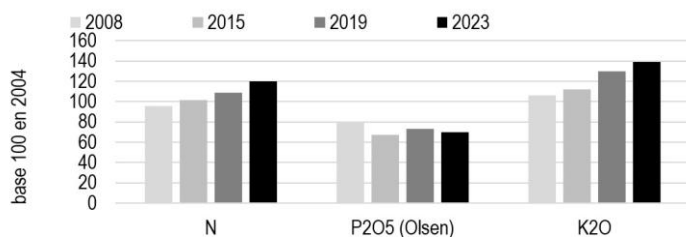
Le bilan indique un léger excédent en azote (+ 25 U d'N/ha/an) lié à la forte contribution des légumineuses fourragères dans le système. En effet, 140 tMS/an sont produites par des légumineuses, qu'il s'agisse de légumineuses pures comme la luzerne ou de légumineuses associées dans des mélanges en prairie (trèfles, lotier). Dans le modèle utilisé, une entrée de 35 U d'N/ha/an par tMS de légumineuse est retenue. Ce niveau retenu dans l'approche bilan des minéraux du dispositif INOSYS réseaux d'élevage est cohérent avec l'équation proposée par Vertès et al (2010) pour les trèfles :

$$N \text{ fixé} = \text{Biomasse aérienne du trèfle} \times N\% \text{ du trèfle} \times 85\% \text{ de taux de fixation} \times 1,3 \text{ (dépôt racinaire)}$$
 avec 20 % de MAT sur les légumineuses prairiales de la ferme expérimentale (3,2 % de N). La variabilité interannuelle de cette contribution peut être importante en fonction des variations de productivité des prairies ($\pm 20\%$ / an) et de la part de légumineuses dans ces dernières (ex : 25 % $\pm$ 12 % en moyenne annuelle sur des prairies multi espèces). Ce bilan reste néanmoins toujours excédentaire. Sur l'azote, les questions sont davantage liées à sa mise à disposition pour les plantes en cours de culture suivant la quantité de reliquat azoté sortie d'hiver et les conditions de minéralisation au printemps.

Le bilan est légèrement déficitaire en phosphore (- 6 U d'N/ha/an), les entrées sont très faibles et ne compensent pas les sorties. Enfin sur le potassium, le bilan est à l'équilibre, l'entrée même modeste par les achats de paille permet de compenser un niveau d'exportation par ailleurs faible dans la viande



bovine. Ces résultats sont relativement cohérents avec les bilans des minéraux réalisés sur des élevages allaitants (réseau INOSYS, 2020). On notera cependant que là où le bilan est légèrement positif en potassium pour ces élevages du réseau ligérien, il est seulement à l'équilibre dans le cas de



la ferme expérimentale. Dans ces élevages, la part d'achat de paille et son corollaire l'entrée de potassium sont plus conséquents.

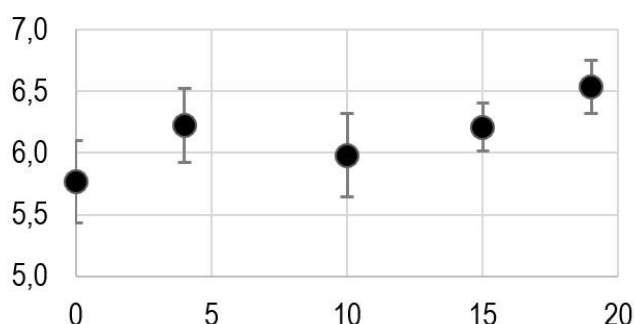
Figure 2 : Evolution des teneurs du sol sur 14 parcelles en rotation.

4.2. Teneurs en N, P, K des sols

Pour analyser finement l'évolution de ces teneurs, un focus sur 14 parcelles en rotation depuis 2014 a été réalisé (figure 2). Les résultats sont exprimés en base 100 de l'année 2004. En vingt ans, la teneur en azote a augmenté de 20 %. Ces résultats sont assez cohérents avec l'entrée d'azote fournie par les légumineuses. Les teneurs en phosphore ont chuté relativement rapidement entre 2004 et 2008 avec une chute de 20 %. Cette observation est relativement cohérente avec le bilan des minéraux sur le phosphore (- 6 U d'N/ha). On note cependant un maintien de la teneur autour de 75 % (pour 2015, 2019, 2023) de la teneur de 2004. Les teneurs en potassium ont régulièrement augmenté, un résultat assez surprenant au regard du bilan à l'équilibre en potassium. Cette observation pourrait être liée à un apport un peu plus régulier sur ces 14 parcelles d'un compost de fumier de bovins pailleux relativement riche en potassium. Cette observation pose les questions de transfert de fertilité au cœur de la gestion de la fertilité des sols en AB. Un risque lié au parcellaire est bien identifié : deux ilots, d'une vingtaine d'hectares chacun, éloignés de 7 km, sont composés exclusivement de prairies permanentes. Le risque est une exportation fréquente de biomasse sous forme de foin, consommé et restitué en partie sous forme de déjections ou de retours organiques plus fréquents sur le site principal. Une attention particulière est portée ces dernières années pour éviter ce phénomène sur ces ilots en privilégiant l'alternance fauche/pature. Des pratiques comme le Bale-Grazing (mise à disposition cohérente de foin directement sur les parcelles) sont également en cours d'expérimentation, afin de permettre notamment un retour organique plus direct sur ces ilots éloignés.

4.3. Statut acido / basique

Les sols de la ferme sont à tendance acide. Pour éviter une acidification préjudiciable au fonctionnement du sol et au couvert végétale, 48 t de carbonate sont utilisés en moyenne chaque année. Pour chaque parcelle, ceci représente un apport moyen tous les 4 à 5 ans de 1,5 t/ha sur 32 ha



/ an soit ≈ 180 u de VN (valeur neutralisante) / ha / an. Ces apports permettent de maintenir un pH (figure 3) et un taux de saturation (Ca/CEC : 75 % +/- 5 en 2023) compatibles avec un bon fonctionnement agronomique. Ils permettent également d'accroître les teneurs en calcium et magnésium naturellement présents dans le carbonate apporté (figure 4).

Figure 3 : Evolution du pH ($n=14$ parcelles)

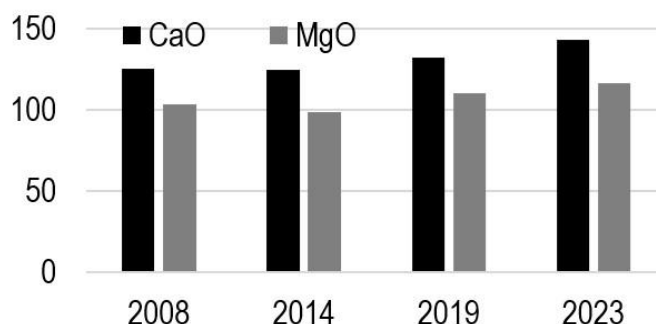


Figure 4 : Evolution base 100 2004 (n=14)

4.5. Focus sur le phosphore

L'analyse a porté sur les données de teneurs en phosphore de près de 400 fourrages (enrubannage n= 96 ; ensilage céréales/protéagineux n= 33 ; foin de luzerne n= 24 ; herbe pâturée n= 72 ; foin de prairie de graminée n=172) depuis 20 ans.

Aucune baisse de la teneur en phosphore de ces fourrages n'est observée sur 20 ans (figure 5).

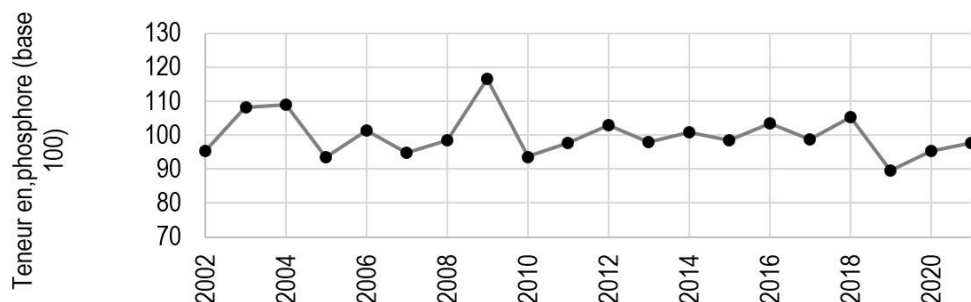


Figure 5 : Evolution teneurs en phosphore, base 100 par type de fourrage

Aucun lien direct entre la teneur du sol en P₂O₅ et les teneurs en phosphore des fourrages obtenues sur ces sols n'a été mis en évidence (figure 6).

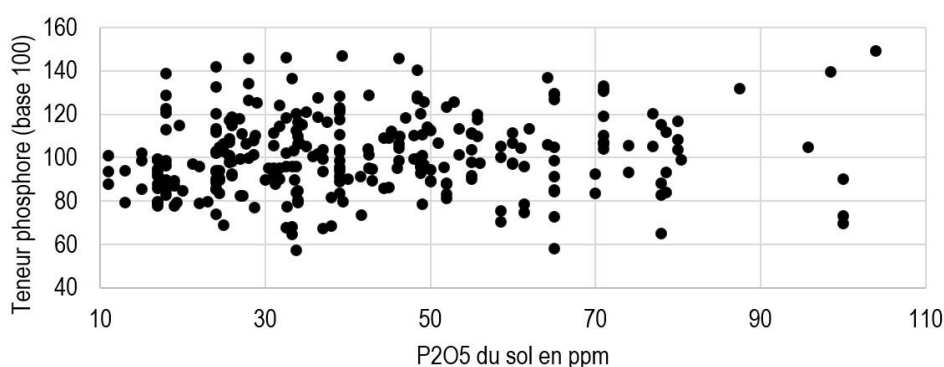


Figure 6 : Corrélation teneur en P, fourrages en fct teneur P₂O₅ parcelle

4.6. Matières organiques

Le taux de matière organique moyen augmente de façon régulière depuis 20 ans. Il est passé de 2,4 % en 2004 à 3,3 % en 2023. En 2023, aucune parcelle n'avait un taux de MO < à 1,5 %. Certaines prairies permanentes avaient atteint un taux supérieur à 4,5 % (figure 7). En 2023, ces prairies permanentes



sont en moyenne à 3,9 % de MO et les parcelles en rotation à 2,9 % (figure 8). Ces progressions importantes pourraient s'expliquer par : i) des teneurs initiales relativement faibles pour certaines parcelles, ii) une amélioration de leur statut acido/basique (certaines parcelles avaient un pH < 5,5 au début des années 2000), iii) une optimisation de l'alternance fauche/pature et du retour organique sur les prairies permanentes, iv) la mise en œuvre d'une rotation longue de 8 ans avec 5 ans en prairie sur les parcelles en rotation.

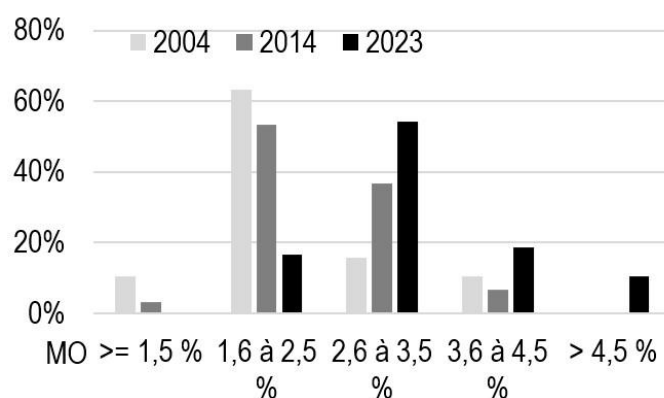


Figure 7 : Répartition en classe de MO de l'ensemble des parcelles analysées

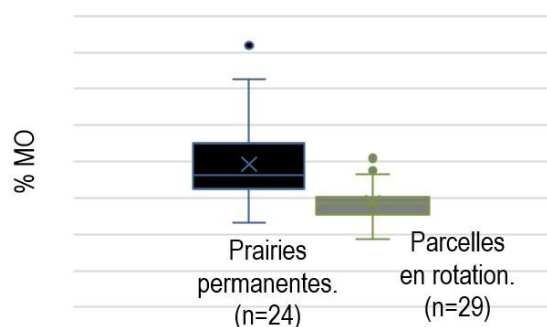


Figure 8 : Teneurs moyennes en MO en 2023

Sur les 14 parcelles en rotation étudiées, le taux moyen de MO est passé de 2,2 à 3,0 % (figure 9). Le rythme moyen d'augmentation est relativement linéaire avec +0,044 % de MO / an.

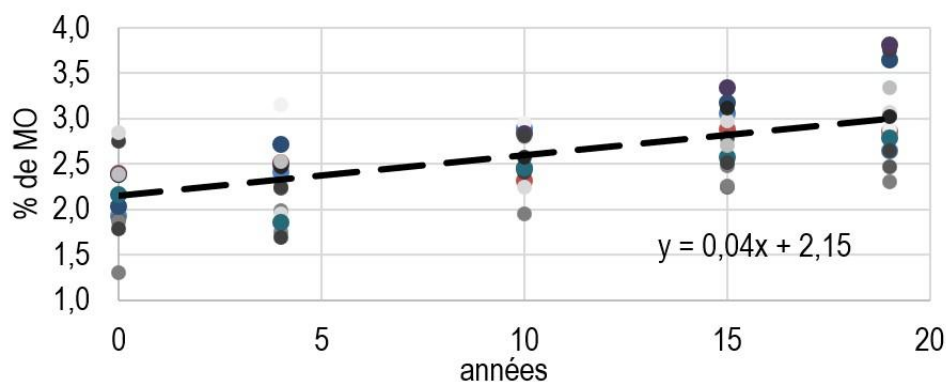


Figure 9 : Evolution du taux de matière organique de 14 parcelles



Un léger accroissement du rapport C/N (tableau 1) traduit une accumulation de carbone stable avec des

Tableau 1 : Evolution du rapport C/N

Année	0	5	10	15	20
C/N	8,2	9,1	9,6	9,7	9,5

rapports qui restent cohérents avec un fonctionnement convenable du sol.

L'équilibre cible sur la compartimentation des matières organiques se situe entre : 70-80 % de MO stable et 20-30 % de MO libre (groupe d'experts, MASA, 2017).

Sur les 7 parcelles analysées (figure 10) : 4 parcelles en rotation (MP1 à P6A) et 3 prairies permanentes (G5, SV1D, S10) dans des potentiels de sol variables, l'équilibre MO stable et libre est convenable. A ce stade, nous ne mettons pas en évidence de lien entre le potentiel du sol, les modalités d'exploitation des parcelles et les compartimentations des matières organiques observées.

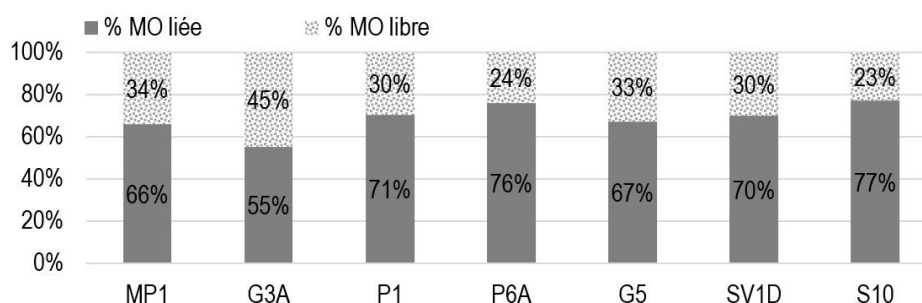


Figure 10 : Equilibre des matières organiques

5. Synthèse, discussions et perspectives

Malgré des sols à faible potentiel et le recours à très peu d'intrants, ce système de polyculture-élevage bovins allaitant autonome, conduit en AB, qui laisse une large place aux prairies pâturées, obtient donc une trajectoire très encourageante d'évolution des indicateurs de la fertilité chimique de ses sols. Dans la rotation, la présence de prairies temporaires (70 % de la durée de la rotation), la quasi-absence de sol nu (< 5 % de cette durée), l'utilisation de flores diversifiées peuvent être des facteurs explicatifs de cette trajectoire.

Les légumineuses prairiales et les protéagineux associés aux cultures annuelles permettent une entrée significative et intéressante d'azote sur le système. Si le bilan des minéraux est légèrement déficitaire en phosphore, ce minéral ne semble pas avoir été identifié comme un facteur limitant dans ce système polyculture/élevage à grande dominante élevage. Ce quid du phosphore pourrait potentiellement devenir plus problématique pour les systèmes en grandes cultures biologiques avec des niveaux d'exportation par hectare plus élevés. Il pourrait par ailleurs être pertinent de poursuivre les observations sur le phosphore (quid de sa biodisponibilité dans le sol et de sa mesure).

L'utilisation régulière de carbonate (1,5 t/ha tous les 3 à 4 ans) reste un levier nécessaire pour maintenir des pH et un taux de saturation satisfaisants pour assurer un fonctionnement optimal du sol.

L'augmentation des taux de matière organique est importante et très satisfaisante. Sur ces sols à potentiel limité, peu profonds et marqués par l'alternance hydrique, ce gain en matière organique permet d'augmenter la stabilité structurale de ces sols sensibles à la battance, d'accroître la capacité d'échange cationique et participe également à l'accroissement de la réserve hydrique. Le taux de matière organique moyen a augmenté de plus de 40 % en 20 ans (et près de 30 % pour les parcelles



en rotation). Les prairies pâturées en rotation par le dépôt racinaire et les restitutions au pâturage semble un pilier essentiel à l'entrée de carbone (et d'azote). L'augmentation du stock de matière organique à l'échelle du système tient vraisemblablement à l'intégration de prairies temporaires en rotation, ayant la capacité de fixer du carbone et donc de potentiellement enrichir le sol.

En ce qui concerne le stockage additionnel de carbone, de premières estimations encourageantes seront confortées très prochainement par les résultats de densité apparente des sols permettant de fiabiliser les résultats. Le potentiel de stockage de carbone sous prairie temporaire reste discuté notamment en fonction du nombre d'années de présence de prairie dans la rotation et des pratiques (Chenu *et al*, 2014, Klump *et al*, 2015).

En termes de gestion de la fertilisation azotée et de dynamique de l'azote, des analyses complémentaires doivent être réalisées. Actuellement la majorité des effluents d'élevage (fumier de bovins pailleux) est compostée. Le compost conduit à l'obtention d'un produit à la matière organique très stable, favorable au maintien du stock d'humus (Bouthier *et al*, 2014). Cette utilisation exclusive d'un apport de compost très stabilisé interroge sur ses conséquences en termes d'alimentation des différents compartiments de la matière organique du sol (matière organique stable ou libre). La question sous-jacente plus globale est la capacité du système de culture et de sa conduite à mettre à disposition suffisamment d'éléments nutritifs pour l'activité biologique. Il s'agira d'affiner et de mieux comprendre le rôle de la biodiversité fonctionnelle du sol sur les dynamiques d'activité biologique du sol. Une meilleure connaissance des impacts des amendements organiques suivant leurs caractéristiques (fumier frais, compost obtenu en aérobie ou anaérobie...) avec des mesures de flux des matières organiques libres et liées permettraient de mieux appréhender et caractériser les dynamiques de carbone et d'azote dans les sols suivant les pratiques.

Globalement la valorisation par un troupeau de bovins allaitants de la très grande majorité de la surface permet une exploitation sobre et une valorisation durable de sols à potentiels limités.

Néanmoins, sans remettre en cause le système de culture qui permet une amélioration de plusieurs indicateurs de fertilité chimique, l'allocation d'une vingtaine d'hectares de cultures annuelles pour l'alimentation du troupeau pose davantage question. Si les associations de céréales/protéagineux ont démontré leurs intérêts pour sécuriser la production fourragère grâce notamment à l'implantation de prairies sous couvert, le recours à des cultures récoltées en grains interroge. Dans une perspective de réduction de la compétition feed/food, l'ensemble des travaux en cours visant à réduire l'utilisation de matières premières (leviers techniques et génétiques) pour l'alimentation du troupeau pourrait in fine permettre d'allouer une surface un peu plus importante aux cultures de vente à destination de l'alimentation humaine.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Déclaration d'intérêt



Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a été réalisée avec la participation financière de la Région Pays de la Loire.

Références bibliographiques

- Bouthier *et al*, 2014 *Valoriser les indicateurs microbiologiques en grandes cultures et en polyculture-élevage* 12èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse COMIFER-GEMAS Lyon – 18&19 nov. 2015
- Bouthier *et al* 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 (2014), 125-139
- Chenu C. *et al*, 2014, *Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France*, *Innovations agronomiques* 37 (2014), 23-37
- Comifer, 2019, *La fertilisation P -K-Mg – Les bases du raisonnement*, septembre 2019. 39p.
- Fontaine L. *et al.*, 2019. *InnovAB - Améliorer les systèmes de grande culture en agriculture biologique : enseignements d'un réseau d'expérimentations de longue durée*, *Innovations agronomiques*, 71, 295-309.
- Groupe d'experts initié par le Ministère en charge de l'agriculture, 2017, *Tour d'horizon des indicateurs relatifs à l'état organique et biologique des sols* p. 11 disponible sous : <https://agriculture.gouv.fr/tour-dhorizon-des-indicateurs-relatifs-etat-organique-et-biologique-des-sols>
- Jouany C. *et al*, 2005, *Diagnostic du statut de nutrition phosphatée et potassique des prairies naturelles en présence de légumineuses*, *Fourrages* (2005) 184, 547-555
- Klump K.*et al*, 2015, *Le stockage de carbone des prairies permanentes et temporaires, le lien au 4 pour 1000*, *Rencontres recherches Ruminants* (2015)
- Plassard *et al*, 2015 *Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol*, disponible sous : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01223555>
- Réseau d'élevage viande bovine Inosys des Pays de la Loire/Bretagne 2020, *3 cas types de systèmes spécialisés en élevage allaitant conduits en AB dans l'ouest*, *Chambres d'agriculture et Idele*, 2020
- Vérice G. *et al*, 2018, *Bilan de 12 ans de suivi de la fertilité du sol*, disponible sous : <https://www.arvalis-infos.fr/bilan-de-12-ans-de-suivi-de-la-fertilite-du-sol-@/view-27784-arvarticle.html>
- Vertès F *et al*, *Connaitre et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle de la culture, de la rotation et de l'exploitation*, *Innovations agronomiques* 11 (2010), 25-44

Pour citer cet article : Bertrand Daveau. Evolution et gestion de la fertilité des sols d'un système bovins viande autonome en agriculture biologique. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, [10.17180/ciaq-2025-vol106-art03](https://doi.org/10.17180/ciaq-2025-vol106-art03)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



Circularité de l'azote et besoins énergétiques de fermes en agriculture biologique situées en Bretagne : enseignements d'une analyse de terrain

Quentin BELLANGER^{*1}, Fabrice BELINE¹, Aurélie WILFART¹, Fanny VERGELY¹, George MAILLARD², Yann EVENAT³, Niels BIZE⁴, Souhil HARCHAOUI¹

¹ INRAE, Institut Agro, SAS, 65 rue de saint Briec, 35 000 Rennes, France.

² Groupement d'agriculteurs biologiques (GAB) 22, 2 av. du Chalutier sans pitié, 22 193 Plérin, France.

³ Groupement d'agriculteurs biologiques (GAB) 29, Écopôle Vernar Piquet, 29 460 Daoulas, France.

⁴ Fédération Régionale des Agrobiologistes de Bretagne (FRAB), 29 av. des peupliers 35 510, Cesson Sévigné, France.

Correspondance : quentin.bellanger@agrocampus-ouest.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art04>

Résumé

L'agriculture biologique suscite un intérêt croissant pour son potentiel à réduire les impacts environnementaux des systèmes agricoles. Cependant, les pratiques de gestion de l'azote et le fonctionnement énergétique des exploitations demeurent peu étudiés. Cette étude a analysé les flux d'azote et d'énergie dans trois fermes en agriculture biologique – maraîchage, polyculture poly-élevage et céréaliculture – en Bretagne. Les résultats montrent que les fermes maraîchères et céréalières investissent plus d'azote et d'énergie pour leur fonctionnement et produisent le plus par unité de surface. Au contraire, la ferme polyculture poly-élevage, grâce à sa forte diversification, nécessite moins d'énergie et recycle mieux l'azote, mais a une faible efficacité de l'azote notamment due aux pertes lors de la gestion des effluents d'élevage. Nos résultats reflètent la diversité de gestion de l'azote, mettant en lumière les échanges locaux de matière pour le fonctionnement des fermes. Toutefois, les choix des agriculteurs sont influencés par la disponibilité des ressources, notamment concurrencés par le développement d'unités de méthanisation.

Mots-clés : Circularité, flux de matière, agriculture biologique, fonctionnement énergétique

Abstract: Nitrogen circularity and energy investment of organic farms: insights from an on-farm analysis

Organic farming is gaining increasing interest for its potential to reduce the environmental impact of farming systems. However, few studies have been conducted on nitrogen management practices and farm energy use. This study analyzed nitrogen and energy flows on three organic farms - vegetable, mixed crop-livestock and cereal farms - in Brittany. The results show that the vegetable and cereal farms invest the most nitrogen and energy in their functioning and produce the most per unit area. On the other hand, mixed crop-livestock farms, due to their strong diversification, require less energy and recycle nitrogen better, but have a low nitrogen efficiency, mainly due to losses in the management of livestock effluents. Our results reflect the diversity of nitrogen management, highlighting local exchanges of matter for farm functioning. However, farmers' choices are influenced by the availability of resources, and by the competition from the development of methanization units.

Keywords: Circularity, material flows, organic farm, energy investment



1. Introduction

L'agriculture biologique (AB) repose sur des principes de durabilité et de respect des cycles naturels, en mettant l'accent sur la gestion des flux de nutriments et d'énergie (Eyhorn *et al.*, 2019). La circularité, c'est-à-dire la capacité à boucler les flux biogéochimiques et énergétiques au sein des systèmes agri-alimentaires, émerge comme un levier essentiel pour l'expansion et la pérennité à grande échelle de l'AB. En effet, la disponibilité en azote, élément clé pour la fertilité des sols et la productivité des cultures, constitue un défi majeur dans un contexte où l'utilisation d'engrais azotés de synthèse est interdite. Les sources d'azote en AB se limitent principalement aux légumineuses, aux fumiers issus de l'élevage et au recyclage des produits résiduels organiques (PROs) issus des collectivités ou des entreprises, mais ces ressources sont insuffisantes à l'expansion de l'AB (Barbieri *et al.*, 2021).

De récents travaux ont permis d'explicitier les principes de la circularité à différentes échelles d'organisation de l'exploitation agricole aux systèmes agri-alimentaires (Muscat *et al.*, 2021 ; Van Loon *et al.*, 2023). Ce concept est mobilisé comme moyen pour réduire les pertes de nutriments (azote, phosphore, carbone) et limiter la dépendance aux intrants externes. Les interprétations de la circularité sont nombreuses, mais la circularité repose entre autres sur 3 principes fondamentaux : réduire, réutiliser et recycler (Harchaoui *et al.*, 2024). Réduire consiste à limiter les intrants extérieurs par des pratiques telles que l'intégration des légumineuses dans les rotations ou l'optimisation des techniques de fertilisation (Billen *et al.*, 2021). Réutiliser renvoie à la valorisation des coproduits agricoles, notamment les effluents d'élevage, qui sont réintroduits dans le système comme fertilisant. Enfin, recycler implique la transformation des déchets en ressources, par exemple par le compostage ou la méthanisation, ce qui permet à la fois de produire des amendements organiques et de générer de l'énergie renouvelable (Bernet et Béline, 2009).

Au-delà des flux de nutriments, la consommation d'énergie constitue un autre enjeu majeur. Bien que l'AB vise à minimiser l'usage des énergies non renouvelables (EU, 2018), les pratiques de travail du sol, l'énergie dans les bâtiments d'élevage, et le transport des intrants maintiennent une dépendance aux énergies fossiles (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018). En comparaison avec l'agriculture conventionnelle, l'AB présente l'avantage de ne pas nécessiter de consommation énergétique liée à la production d'intrants chimiques (Smith *et al.*, 2015). Néanmoins, elle reste tributaire des carburants pour des opérations telles que le désherbage mécanique et les travaux des cultures. L'expansion de l'AB doit s'accompagner d'une réduction dans l'usage des énergies fossiles, ce qui nécessite un approfondissement des connaissances scientifiques afin d'identifier des voies vertueuses vers une sobriété énergétique (Martin *et al.*, 2023). Ainsi la littérature actuelle présente des lacunes concernant les modalités d'échanges de matière et de nutriments, ainsi que l'énergie investie associée à ces flux, entre les exploitations agricoles en AB et d'autres ressources fertilisantes disponibles dans leurs territoires. Pour remédier à ces insuffisances, cette étude se propose de documenter de manière approfondie le fonctionnement azoté et énergétique des fermes en AB ainsi que les échanges de matières dans leur environnement immédiat. Nous nous appuyons sur les travaux récemment menés par Bellanger *et al.* (2024) pour analyser trois systèmes de production peu explorés en AB : le maraîchage, la polyculture poly-élevage et la céréaliculture.

2. Matériel et méthode

2.1. Zone d'étude et présentation des fermes

L'étude a été réalisée en Bretagne, une région agricole au climat océanique, marquée par des hivers doux, des étés frais et des précipitations régulières. Environ 10 % de la surface agricole utile (SAU) est en AB, une proportion similaire à la moyenne nationale (Agence Bio, 2023). Le choix des fermes a été effectué en collaboration avec les salariés du réseau d'agriculteurs biologiques GAB-FRAB. Nous avons sélectionné les productions légumières (maraîchage), polyculture poly-élevage et céréalière qui



représentent 14 %, et 21 % et 36 % des fermes en AB en Bretagne, respectivement (Agence Bio, 2024). Bien que les fermes choisies ne soient pas nécessairement représentatives de leurs catégories de production en Bretagne, elles présentent des modes de fertilisation atypiques identifiés par les techniciens du GAB-FRAB comme peu documentés. Les fermes bovines laitières ont été exclues en raison d'une plus grande disponibilité des références scientifiques existantes (Roberts *et al.*, 2008 ; Einarsson *et al.*, 2018 ; Chmelíková *et al.*, 2021). Parmi les huit fermes sélectionnées dans Bellanger *et al.* (2024) - dont trois maraîchères, quatre en polyculture poly-élevage, une céréalière - nous avons choisi d'approfondir dans cette étude sur trois d'entre elles, chacun représentant une catégorie différente. La première est une ferme maraîchère avec une SAU de 0,6 ha, se situant dans le Morbihan, produisant divers légumes (e.g. tomates, courgettes, pommes de terre) en utilisant des PROs broyés et compostés ainsi que des légumineuses. La seconde est une ferme en polyculture poly-élevage de 46 ha de SAU, se situant dans le Nord de l'Ille-et-Vilaine, associant élevages (bovins viande, porcs et ovins viande) et céréales sans importation de fertilisant extérieur à l'exploitation. La troisième, une ferme céréalière de 44,5 ha de SAU, se situant en Côtes-d'Armor produit principalement du blé, du sarrasin et des fourrages grâce à des fumiers importés, et de la fèverole comme couvert végétal d'interculture. Les données structurelles et opérationnelles (tableau 1) ont été collectées durant des entretiens avec chaque agriculteur à l'aide du questionnaire IDEA4 (Zahm *et al.*, 2023). Les enquêtes ont été menées pendant le printemps 2023 sur les données de l'année 2022. Les données incluent les superficies cultivées, les rendements, les cheptels, les types d'intrants (e.g., aliments, amendements) et les distances de transport considérées comme locales lorsque la distance est inférieure à 50 km.

Tableau 1 : Données structurelles et opérationnelles des trois fermes étudiées. SAU : surface agricole utile, UGB : unité gros bétail. UTH : unité de travail humain.

VARIABLE	MARAICHAGE	POLYCULTURE POLY-ÉLEVAGE	CÉRÉALICULTURE
UTH	2	2,5	3,5
SAU	0,7	46	44,5
TERRE ARABLE (ha)	0,7	44	41,4
PRAIRIE PERMANENTE (ha)	0	2	3,1
UGB	NA	84,6	NA
FERTILISANT	Broyat et compostage de déchets verts importés, légumineuses	Fumier de porcs, bovins et ovins, légumineuses	Fumier de volaille et bovin importé en échange de paille, fèverole
ALIMENTATION ANIMALE IMPORTÉE	NA	Lactosérum, orge, déchets de pain et légume, son de blé, foin	NA
PRODUIT COMMERCIALISÉ	Pommes de terre, tomates, ail, radis, courgettes, aubergines, carottes, poireaux	Viande de porcs, ovins et bovins, blé	Blé, sarrasin, avoine, foin, paille



2.2. Cadre analytique de l'analyse de flux de matière

Nous mobilisons l'analyse des flux de matière pour rendre compte des flux entrants, internes et sortants. Ces flux sont exprimés en kg d'N par unité de surface de SAU. Cette méthode nécessite de définir les limites du système (la ferme), en excluant les étapes de transformation et de distribution (post-ferme). Chaque ferme a été divisée en quatre compartiments : (i) prairies permanentes, (ii) terres arables (incluant prairies temporaires et cultures annuelles), (iii) production animale (viande) et (iv) opérations annexes (gestion des effluents). Les flux entrants ($entrées_{EA}$) incluent la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses (Fix symb), les dépôts atmosphériques (Dep atm), les semences, l'alimentation animale importée, les effluents d'élevage (fumier), les terreaux importés, et les PROs. Les flux internes ont été estimés grâce aux quantités de fumier et de PROs épandues, aux rendements fourragers pour l'alimentation des bovins et aux déjections produites par UGB. Les flux sortants ($sorties_{EA}$) comprennent les céréales et légumes récoltées, les fourrages, les produits animaux (viande) et coproduits (son de blé). Les contenus en azote des produits ont été estimés à partir de sources internationales pour les céréales (Lassaletta *et al.*, 2014) et nationales pour les fourrages, le lait, la viande et les effluents organiques (Agabriel *et al.*, 2007 ; Bloor *et al.*, 2012). Le dépôt atmosphérique a été fixé à 12 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ (FAOSTAT, 2023). La fixation symbiotique a été évaluée en fonction du pourcentage de légumineuse estimé par les agriculteurs et de leurs rendements (Anglade *et al.*, 2015).

L'évaluation des flux énergétiques comprend l'énergie directe investie et l'énergie sortie contenue dans les produits animaux et végétaux. Nous avons exclu l'énergie indirecte. L'énergie directe se compose des carburants consommés (diesel agricole, lubrifiants), l'électricité et le gasoil pour la commercialisation et l'énergie humaine. Bien qu'il existe différentes méthodes (neuf) pour évaluer l'énergie humaine investie en agriculture, nous avons fait le choix d'utiliser l'énergie métabolisée totale pendant le temps de travail (Fluck, 1992). Ainsi, l'énergie investie correspond au total de temps travaillé sur la ferme par UTH multipliés par le temps de travail hebdomadaire multiplié par 0,7 Joule (J) par heure. Les valeurs de conversion énergétique ont été extraites de bases de données nationales (e.g., Agribalyse®). L'ensemble des méthodes de calculs et facteurs de conversion sont explicités dans Bellanger *et al.* (2024).

2.3. Indicateurs des performances : agronomiques, efficience, autonomie, énergétique et circularité

Les performances des fermes ont été caractérisées en utilisant trois indicateurs agronomiques, un indicateur d'efficience, deux indicateurs d'autonomie, trois indicateurs pour l'énergie et deux indicateurs pour la circularité. Les entrées ($entrées_{EA}$, kg N·ha⁻¹·an⁻¹) et la productivité ($sorties_{EA}$, kg N·ha⁻¹·an⁻¹) correspondent à la somme des intrants et des produits sortants de la ferme par unité de SAU, le surplus d'azote ($surplus_{EA}$, kg N·ha⁻¹·an⁻¹) est la différence entre $entrées_{EA}$ et $sorties_{EA}$, l'efficience de l'utilisation de l'azote (NUE_{EA} , %) a été déterminée en divisant les $sorties_{EA}$ par les $entrées_{EA}$. Pour l'autonomie, nous avons différencié l'autonomie azotée à l'échelle de la ferme ($autonomie_{EA}$, %) et locale ($autonomie_{locale}$, %). $autonomie_{EA}$ inclut la fixation biologique et les dépôts atmosphériques divisés par $entrées_{EA}$, tandis que $autonomie_{locale}$ mesure la proportion des intrants provenant d'une distance inférieure à 50 km.

Concernant les besoins énergétiques, nous avons estimé l'énergie investie (EI_{EA} , GJ·ha⁻¹·an⁻¹) qui correspond à la somme des énergies directes. L'énergie exportée (ES_{EA} , GJ·ha⁻¹·an⁻¹) correspond à la somme des produits exportés des fermes. La part d'énergie non renouvelable ($E_{non-renouvelable}$, %) a été estimée en supposant que 10 % de l'énergie investie (électricité) provient d'énergie renouvelable.

Deux indicateurs issus de l'analyse des réseaux écologiques ont été calculés : le taux de circulation interne (ICR , %) et l'indice de recyclage de Finn (FCI). Le taux de circulation interne mesure la proportion de l'azote interne recyclé à travers l'ensemble des compartiments de la ferme en divisant les



flux internes totaux (TT) par les flux globaux du système (TST) (Puech et Stark, 2023). L'indice de recyclage de Finn reflète l'efficacité globale du recyclage des flux, calculée comme le ratio des flux qui sont cyclés (i.e. qui restent dans la ferme) par rapport aux flux totaux (TST). Les détails des calculs de chaque flux sont disponibles dans la table S7 du supplément de Bellanger et al. (2024).

2.4. Atelier d'échange avec les agriculteurs

À posteriori des enquêtes, nous avons réalisé un entretien (2h) avec les agriculteurs pour leur présenter nos résultats et recueillir leurs commentaires et analyses.

3. Résultats

Les systèmes agricoles étudiés ont présenté des différences marquées en termes de flux d'azote et d'énergie, ainsi que de circularité. Les $entrées_{EA}$ variaient à la fois en quantité et en origine. La polyculture poly-élevage s'est distinguée par une contribution majeure de la fixation symbiotique ($39,1 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) dans les entrées totales (48 %) (fig. 1a) et par le recyclage interne, notamment via les bovins, qui ont fourni $128 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (fig. 2d) sous forme de déjections. Ces flux internes ont contribué à une $autonomie_{EA}$ de 63 %, intégralement assurée par un approvisionnement en alimentation locale pour les bovins conduisant à une autonomie locale de 100 % (tableau 2). En revanche, la ferme maraîchère dépendait fortement des intrants externes, avec des apports de PROs ($57,7 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et de terreau ($39,5 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), totalisant 58 % des $entrées_{EA}$. Cependant, 65 % de ces intrants provenaient du territoire (<50 km) (tableau 2). Enfin, la ferme céréalière a intégré pour moitié l'apport d'azote par les légumineuses ($47,9 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et par le fumier ($51,2 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), importé en échange de paille avec des éleveurs locaux ($autonomie_{locale}$: 100 %). Ces entrées diversifiées lui ont permis d'atteindre une $autonomie_{EA}$ de 54 %.

Les $sorties_{EA}$ ont varié de $19 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour la ferme en polyculture poly-élevage à $107,9 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour la ferme maraîchère (tableau 2), dues à des cycles de production des légumes rapides. Cependant, la ferme maraîchère a présenté des sorties moins diversifiées que la ferme en polyculture poly-élevage et la ferme céréalière, qui ont totalisé cinq produits différents (fig. 2a). Le $bilan_{EA}$ a été directement influencé par cette productivité. Il a été plus élevé pour la ferme polyculture poly-élevage ($63 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) (tableau 2) en raison de la faible efficacité de conversion de l'azote par les bovins (7 %, Bellanger et al. (2024)). La ferme céréalière a affiché le surplus le plus faible ($37 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), grâce à des rendements plus élevés et une meilleure gestion des ressources internes, comparée à la ferme maraîchère qui a présenté un surplus de $61 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, valorisant moins l'azote à travers ses productions.

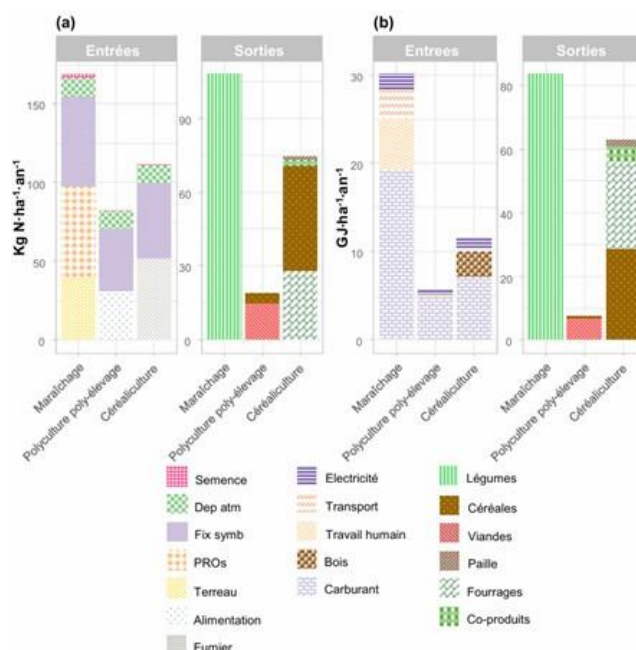


Figure 1 : Entrées et sorties d'azote ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) (a) et d'énergie ($\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) (b) pour la ferme maraîchère, polyculture poly-élevage et céréalière).

Les flux énergétiques ont apporté une vision complémentaire sur la caractérisation des fermes. L'énergie investie la plus élevée était pour la ferme maraîchère, avec une EI_{EA} de $30 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (fig. 1b), et une dépendance aux énergies non renouvelables élevée de 75 % (tableau 2). Toutefois, le travail humain a contribué à 20 % de cette énergie investie. La ferme polyculture poly-élevage a investi le moins d'énergie ($5,7 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), et 89 % provenaient d'énergie non renouvelable. Enfin, la ferme céréalière a investi $11,6 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ pour son fonctionnement, dont $2,3 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ issus du bois utilisé pour la transformation des céréales sur la ferme (fig. 2b), contribuant à réduire sa dépendance aux énergies non renouvelables ($E_{non-renouvelable}$: 64 %).

Tableau 2 : Résultats des indicateurs agronomiques, d'efficacité, d'autonomie, d'énergie et de circularité des trois fermes.

INDICATEUR	UNITÉ	MARAICHAGE	POLYCULTURE POLY-ÉLEVAGE	CÉRÉALICULTURE
$entrees_{EA}$	$\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	168,9	82,2	111,3
$sorties_{EA}$	$\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	108	19	75
$surplus_{EA}$	$\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	61	63	37
NUE_{EA}	%	64	23	67
$autonomie_{EA}$	%	41	63	54
$autonomie_{locale}$	%	65	100	100
EI_{EA}	$\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	30,1	5,7	11,6
ES_{EA}	$\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$	83,6	7,4	62,8
$E_{non-renouvelable}$	%	75	89	64
FCI	-	0	0,53	0

ICR	%	41	77	29
-----	---	----	----	----

La circularité des flux d'azote a été nettement marquée en polyculture poly-élevage, avec un *ICR* de 77 % et un *FCI* de 0,53. Ce système a bénéficié des interactions cultures-élevage : les bovins ont exporté 128 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ vers les terres arables, les porcs 9,3 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ et les ovins 1,5 kg N·ha⁻¹·an⁻¹. Les fermes maraîchères et céréalières, malgré des *FCI* nuls, ont recyclé respectivement 41 % et 29 % de l'azote importé par les PROs et fumiers importés.

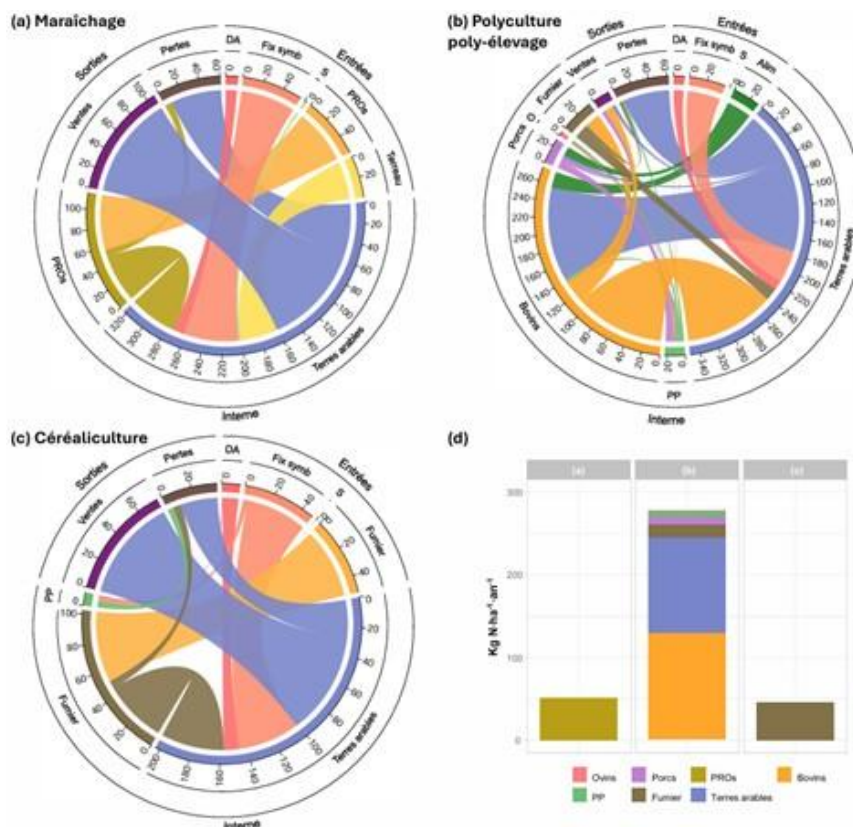


Figure 2 : Flux d'azote (kg N·ha⁻¹·an⁻¹) pour l'exploitation maraîchère (a), polyculture poly-élevage (b) et céréalière (c). Le graphique (d) montre les quantités d'azote échangées (kg N·ha⁻¹·an⁻¹) entre les compartiments de l'exploitation agricole. DA : dépôt atmosphérique, O : ovins, PP : prairies permanentes, PROs : produits résiduels organiques, S : semence.

4. Discussion

4.1. Le cadre de l'étude

Cette étude a permis d'illustrer les flux d'azote et le fonctionnement énergétique de trois systèmes agricoles en AB situés en Bretagne, mais elle présente certaines limites. D'abord, nous avons évalué la circularité de l'azote et les besoins énergétiques à l'échelle temporelle d'une année dans un échantillon resserré de fermes en AB en Bretagne. Ces trois fermes ne sont pas nécessairement représentatives de l'ensemble des exploitations en AB : par exemple la ferme céréalière, avec 44 ha, est légèrement en dessous de la moyenne nationale d'environ 65 ha (Agence Bio, 2012). L'utilisation d'un modèle d'évaluation pluriannuel permettrait de réduire les incertitudes posées par cette méthode (Pinsard *et al.*, 2021), de même qu'un changement de localisation géographique des fermes (Steinmetz *et al.*, 2021). Également, la méthode de modélisation utilisée ne prend pas en compte les changements de stocks d'azote organique dans les sols (Nowak *et al.*, 2013 ; Watson *et al.*, 2002). Nous estimons des surplus d'azote qui intègrent à la fois des pertes et le changement de stock d'azote. Toutefois, ces stocks



peuvent varier de 20 à 50 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ en AB (Autret *et al.*, 2019), pouvant entraîner une sous-estimation de certains recyclages internes, comme l'incorporation des résidus de culture. Enfin, l'énergie indirecte a été exclue de cette étude. Or, Pimentel *et al.* (1983) estiment qu'en AB, elle peut représenter jusqu'à 49 % de l'énergie totale investie pour la production de blé.

4.2. Flux d'azote et besoins en énergie

Alors que de nombreuses études se concentrent sur les surplus d'azote (Chmelíková *et al.*, 2021 ; Roberts *et al.*, 2008), peu ont investigué les réseaux de flux d'azote à l'échelle de la ferme conjointement avec les besoins en énergie. Nos résultats pour la ferme polyculture-élevage convergent avec ceux de Puech et Stark (2023), qui ont étudié une ferme expérimentale en polyculture poly-élevage en AB dans le nord-est de la France. Les résultats ont mis en évidence l'importance des synergies entre différents compartiments d'élevage (bovins laitiers, bovins viande, porcs et ovins). Nos résultats montrent une NUE_{EA} similaire entre la ferme polyculture poly-élevage (23 %) et leur ferme (26 %), ainsi qu'un ICR proche (76 % contre 77 %). Les différences majeures concernent les flux entrants. La ferme expérimentale a une stratégie d'autonomie stricte (100 %), alors que la ferme polyculture poly-élevage a une stratégie de valorisation de produits et coproduits locaux, comme du lactosérum, des déchets de biscuits, et du foin local pour les bovins. Une autre étude concernant une ferme laitière conventionnelle étudiée aux Pays-Bas par van Loon *et al.* (2023) a révélé un FCI de 0,35, inférieur à celui de la ferme polyculture poly-élevage (0,53). Cette différence s'explique par le nombre supérieur d'ateliers de production animale, augmentant la densité du réseau de flux internes.

Les $entrées_{EA}$ pour la ferme maraîchère montrent une dépendance en azote aux matières organiques externes (41 %), mais une part non négligeable (34 %) provient de la fixation symbiotique. Ces résultats sont conformes à ceux de Oelofse *et al.* (2010), qui ont également observé des variations importantes dans les systèmes maraîchers en AB en fonction de l'intensité de production. De même, la fixation symbiotique représente les entrées majoritaires d'azote dans la ferme polyculture poly-élevage (48 %) ainsi que celle de Puech et Stark (2023) (70 %). Les sorties de la ferme polyculture poly-élevage sont similaires à la ferme de Puech et Stark (2023) (15,4 contre 19 kg N·ha⁻¹·an⁻¹), et l'échantillon de fermes polyculture poly-élevage en AB étudiées dans Nowak *et al.* (2013) (15,3 – 17,3 kg N·ha⁻¹·an⁻¹).

Les résultats pour l'autonomie ($autonomie_{EA}$) confirment les conclusions de Reimer *et al.* (2020), selon lesquelles l'AB ne garantit pas nécessairement une autosuffisance en azote à l'échelle de la ferme. En revanche, l'évaluation de l'indicateur d'autosuffisance en azote évalué à l'échelle locale (c'est-à-dire dans un périmètre de 50 km) révèle que les exploitations de polyculture poly-élevage et céréalière atteignent une autosuffisance de 100 %, alors que les autosuffisances à l'échelle de la ferme étaient respectivement à 63 et 54 %. Cette différence s'explique par l'échange de ressources et de matières azotées avec d'autres fermes environnantes. Les fermes étudiées montraient une dépendance à des ressources locales, telles que les PROs issues de collectivités locales et fumiers des fermes voisines. Bien que cela réduise l'utilisation de combustibles fossiles pour la production et le transport (Martin *et al.*, 2023), cette dépendance aux ressources externes locales pourrait devenir problématique si leurs disponibilités venaient à diminuer. Les agriculteurs ont en effet fait part de leurs préoccupations concernant la concurrence accrue des unités de méthanisation qui tendent à capter ces ressources. Ceci souligne l'importance de cartographier de manière précise les gisements locaux de nutriments pour faciliter l'expansion de l'AB dans un territoire.

4.3. Points de vue des agriculteurs

Lors de l'atelier de clôture, tous les agriculteurs ont jugé l'analyse des flux d'azote et d'énergie utile pour fournir une vision holistique de leurs exploitations. Ils ont particulièrement apprécié la possibilité d'identifier les points faibles et les opportunités d'amélioration grâce à cette approche. Cependant, ils ont souligné que la gestion des fertilisants en AB nécessite de prendre en compte des analyses



pluriannuelles pour mieux capturer la nature dynamique de leurs systèmes, notamment en ce qui concerne les changements annuels des stocks d'azote dans les sols. De plus, bien que les indicateurs comme NUE_{EA} soient pertinents en agriculture conventionnelle, les agriculteurs ont exprimé des doutes quant à leur pertinence en AB, où l'objectif est souvent davantage axé sur la santé des sols et des cultures que sur l'optimisation pure des rendements. Enfin, le calcul des besoins énergétiques a confirmé l'importance du travail des agriculteurs en AB, une dimension souvent négligée dans les approches quantitatives mais qui a un impact direct sur la gestion des fermes. Ceci est confirmé par les données statistiques nationales qui montrent que l'AB emploie en moyenne 2,4 UTH, contre 1,6 UTH en agriculture conventionnelle (Agence Bio, 2023).

Nous avons montré que 65 % des PROs viennent du territoire et sont mis à disposition gratuitement par les collectivités locales. Cependant, le développement de la méthanisation en Bretagne (+19 % entre 2021 et 2022) entraîne une concurrence sur la disponibilité de cette ressource, avec un détournement des gisements de PROs pour des fins de production de bioénergie. Bien que les PROs représentent 1 % de la quantité totale de matière utilisée, soit 20 000 tonnes (DREAL, 2024), le changement d'utilisation de ces gisements pourrait augmenter avec le développement du biogaz voulu dans le cadre des transitions énergétiques (ADEME, 2025). Les agriculteurs ont également identifié plusieurs pistes d'investissement pour réduire les pertes d'azote, notamment la mise en place de couvertures pour le stockage d'effluents. Ces infrastructures pourraient diminuer les pertes d'azote gazeuses de 80 % et aussi améliorer l'efficacité globale des apports organiques (Shah *et al.*, 2012).

5. Conclusion

Cette étude fournit des références sur le degré de circularité de l'azote, le bilan énergétique et l'efficacité des intrants azotés dans divers systèmes d'exploitation agricoles en AB. Elle met en évidence une variété de stratégies de fertilisation, soulignant l'importance d'accompagner l'expansion de l'AB avec des stratégies qui favorisent les échanges de ressources azotées entre exploitations, tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles. De plus, l'exploration d'autres flux de nutriments, tels que le phosphore, le potassium et le carbone, pourrait enrichir notre compréhension des flux au sein de ces systèmes. Cette recherche ouvre également des perspectives pour des études futures, notamment sur l'intégration des distances de transport des sources d'azote dans le bilan énergétique des exploitations, nécessitant l'identification des intrants et la cartographie des flux. Enfin, cette analyse incite à poursuivre les travaux de documentation d'autres fermes biologiques, en tenant compte des ressources locales en nutriments et des échanges inter-exploitations afin de mieux comprendre la diversité des pratiques en AB.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Quentin BELLANGER : <https://orcid.org/0000-0001-7482-5660>

Fabrice BELINE : <https://orcid.org/0000-0003-1885-1842>

Aurélien WILFART : <https://orcid.org/0000-0002-3593-0334>



Souhil HARCHAOU : <https://orcid.org/0000-0002-6407-8291>

Contributions des auteurs

Q.B. et S.H. ont contribué à la conception de l'article. Q.B. a réalisé l'ensemble de la collecte et de l'analyse des données, préparé les supports et rassemblé les informations. S.H. a assuré une orientation générale sur la direction de l'étude. Q.B. a créé toutes les figures et tous les tableaux. Q.B. et S.H. ont exploré les retours des agriculteurs. Y.E., G.M. et N.B. ont facilité l'accès aux agriculteurs. F.B., S.H. et N.B. ont assuré le financement du projet. Q.B. et S.H. ont interprété les résultats. Tous les auteurs ont approuvé la version soumise du manuscrit.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement les trois agriculteurs pour leur temps et leur aide lors de la collecte des données sur leurs exploitations.

Déclaration de soutien financier

Cette étude a bénéficié d'un soutien financier de l'INRAE à travers le métaprogramme interne sur l'agriculture biologique METABIO – projet exploratoire intAB (2022–2024) et a été soutenue par la Région Bretagne dans le cadre du programme de recherche participative Recherche et Société 2021 - circulAB (2022–2024).

Références bibliographiques

- ADEME. (2025). *Production et valorisation de biogaz et perspectives pour la filière française de méthanisation*. La librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/societe-et-politiques-publiques/2893-2901-production-et-valorisation-de-biogaz-et-prospectives-pour-la-filiere-francaise-de-methanisation.html>
- Agabriel, J., Aufrère, J., Baumont, R., Bocquier, F., Bonnefoy, J.-C., Champciaux, P., Delagarde, R., Delaby, L., D'Hour, P., Dulphy, J.-P., Faverdin, P., Garcia, L., Giger-Reverdin, S., Hassoun, P., Meschy, F., Micol, D., Nozières, M.-O., Peyraud, J.-L., Pomiès, D., ... Tran, D. (2007). *Alimentation des bovins, ovins et caprins: Besoins des animaux, valeurs des aliments : tables Inra 2007*. Editions Quae.
- Agence Bio. (2012). *L'agriculture bio en France*. https://www.agencebio.org/sites/default/files/upload/documents/4_Chiffres/BrochureCC/CC2012_Chap4_1_Prod.pdf
- Agence Bio. (2023). *Les chiffres du BIO Panorama 2022*. <https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2023/06/AB-PRESSE-2023-210x297-WEB.pdf>
- Agence Bio. (2024). *Observatoire de la production bio sur le territoire français*. Agence Bio. <https://www.agencebio.org/observatoire-de-la-production-bio-sur-votre-territoire/>
- Anglade, J., Billen, G., & Garnier, J. (2015). Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: Incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere*, 6(3), art37. <https://doi.org/10.1890/ES14-00353.1>
- Autret, B., Beaudoin, N., Rakotovololona, L., Bertrand, M., Grandeau, G., Gréhan, E., Ferchaud, F., & Mary, B. (2019). Can alternative cropping systems mitigate nitrogen losses and improve GHG balance? Results from a 19-yr experiment in Northern France. *Geoderma*, 342, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.039>
- Barbieri, P., Pellerin, S., Seufert, V., Smith, L., Ramankutty, N., & Nesme, T. (2021). Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food*, 2(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>



- Bellanger, Q., Beline, F., Wilfart, A., Vergely, F., Maillard, G., Evenat, Y., Bize, N., & Harchaoui, S. (2024). Exploring nitrogen-flow networks and energy performance of contrasting organic farms. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10384-3>
- Bernet, N., & Béline, F. (2009). Challenges and innovations on biological treatment of livestock effluents. *Bioresource Technology*, 100(22), 5431–5436. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.003>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Le Noë, J., & Sanz-Cobena, A. (2021). Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity. *One Earth*, 4(6), 839–850. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>
- Bloor, J. M. G., Jay-Robert, P., Morvan, A. L., & Fleurance, G. (2012). Déjections des herbivores domestiques au pâturage: Caractéristiques et rôle dans le fonctionnement des prairies. *INRAE Productions Animales*, 25(1), Article 1. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2012.25.1.3196>
- Chmelíková, L., Schmid, H., Anke, S., & Hülsbergen, K.-J. (2021). Nitrogen-use efficiency of organic and conventional arable and dairy farming systems in Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 119(3), 337–354. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10126-9>
- DREAL. (2024). *Synthèse des bilans de fonctionnement des unités de méthanisation sur l'année 2022 en Bretagne*. https://bretagne-environnement.fr/sites/default/files/notices_documentaires/files/DREAL-Synthese-bilans-2022-methanisation.pdf
- Einarsson, R., Cederberg, C., & Kallus, J. (2018). Nitrogen flows on organic and conventional dairy farms: A comparison of three indicators. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 110(1), 25–38. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9861-y>
- EU. (2018). *Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques, et abrogeant le règlement (CE) no 834/2007 du Conseil*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0848>
- Eyhorn, F., Muller, A., Reganold, J. P., Frison, E., Herren, H. R., Lutikholt, L., Mueller, A., Sanders, J., Scialabba, N. E.-H., Seufert, V., & Smith, P. (2019). Sustainability in global agriculture driven by organic farming. *Nature Sustainability*, 2(4), 253–255. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0266-6>
- FAOSTAT. (2023). FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>
- Fluck, R. C. (1992). Chapter 3—Energy of Human Labor. In R. C. Fluck (Ed.), *Energy in Farm Production* (pp. 31–37). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88681-1.50008-9>
- Harchaoui, S., & Chatzimpiros, P. (2018). Can Agriculture Balance Its Energy Consumption and Continue to Produce Food? A Framework for Assessing Energy Neutrality Applied to French Agriculture. *Sustainability*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124624>
- Harchaoui, S., Grillot, M., Courtonne, J.-Y., & Madelrieux, S. (2024). A review of socio-metabolic research on circularity in agri-food systems and pathways to action. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 129(3), 535–556. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10344-x>
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A. M., & Galloway, J. N. (2014). Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry*, 118(1), 225–241. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9923-4>
- Martin, G., Benoit, M., Bockstaller, C., Chatzimpiros, P., Colnenne-David, C., Harchaoui, S., Hélias, A., Pépin, A., Pointereau, P., Van Der Werf, H. M. G., Veyssset, P., Walter, N., & Nesme, T. (2023). Reducing energy consumption without compromising food security: The imperative that could transform agriculture. *Environmental Research Letters*, 18(8), 081001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace462>
- Martin, G., Benoit, M., Bockstaller, C., Chatzimpiros, P., Colnenne-David, C., Harchaoui, S., Hélias, A., Pépin, A., Pointereau, P., van der Werf, H. M. G., Veyssset, P., Walter, N., & Nesme, T. (2023). Reducing energy consumption without compromising food security: The imperative that could transform agriculture. *Environmental Research Letters*, 18(8), 081001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace462>
- Muscat, A., de Olde, E. M., Ripoll-Bosch, R., Van Zanten, H. H. E., Metz, T. A. P., Termeer, C. J. A. M., van Ittersum, M. K., & de Boer, I. J. M. (2021). Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*, 2(8), Article 8. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00340-7>



- Nowak, B., Nesme, T., David, C., & Pellerin, S. (2013). Disentangling the drivers of fertilising material inflows in organic farming. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 96(1), 79–91. <https://doi.org/10.1007/s10705-013-9578-5>
- Oelofse, M., Høgh-Jensen, H., Abreu, L. S., Almeida, G. F., El-Araby, A., Hui, Q. Y., & de Neergaard, A. (2010). A comparative study of farm nutrient budgets and nutrient flows of certified organic and non-organic farms in China, Brazil and Egypt. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87(3), 455–470. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9351-y>
- Pimentel, D., Berardi, G., & Fast, S. (1983). Energy efficiency of farming systems: Organic and conventional agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 9(4), 359–372. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(83\)90021-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(83)90021-X)
- Pinsard, C., Martin, S., Léger, F., & Accatino, F. (2021). Robustness to import declines of three types of European farming systems assessed with a dynamic nitrogen flow model. *Agricultural Systems*, 193, 103215. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103215>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108300>
- Reimer, M., Möller, K., & Hartmann, T. E. (2020). Meta-analysis of nutrient budgets in organic farms across Europe. *Organic Agriculture*, 10(1), 65–77. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00300-8>
- Roberts, C. J., Lynch, D. H., Voroney, R. P., Martin, R. C., & Juurlink, S. D. (2008). Nutrient budgets of Ontario organic dairy farms. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(1), 107–113. <https://doi.org/10.4141/S06-056>
- Shah, G. M., Groot, J. C. J., Oenema, O., & Lantinga, E. A. (2012). Covered storage reduces losses and improves crop utilisation of nitrogen from solid cattle manure. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(2), 299–312. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9543-8>
- Smith, L. G., Williams, A. G., & Pearce, B. D. (2015). The energy efficiency of organic agriculture: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 30(3), 280–301. <https://doi.org/10.1017/S1742170513000471>
- Steinmetz, L., Veyssset, P., Benoit, M., & Dumont, B. (2021). Ecological network analysis to link interactions between system components and performances in multispecies livestock farms. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 42. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00696-x>
- van Loon, M. P., Vonk, W. J., Hijbeek, R., van Ittersum, M. K., & ten Berge, H. F. M. (2023). Circularity indicators and their relation with nutrient use efficiency in agriculture and food systems. *Agricultural Systems*, 207, 103610. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103610>
- Watson, C. a., Bengtsson, H., Ebbesvik, M., Løes, A.-K., Myrbeck, A., Salomon, E., Schroder, J., & Stockdale, E. a. (2002). A review of farm-scale nutrient budgets for organic farms as a tool for management of soil fertility. *Soil Use and Management*, 18(s1), 264–273. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00268.x>
- Zahm, F., Girard, S., Ugaglia, A., Barbier, J., Boureau, J.M., & Carayon, D. (2023). *The IDEA4 method—Farm sustainability indicators. Principles & user guide. Assessing farm sustainability.*

Pour citer cet article : Quentin Bellanger, Fabrice Beline, Aurélie Wilfart, Fanny Vergely, George Maillard, *et al.*. Circularité de l'azote et besoins énergétiques de fermes en agriculture biologique situées en Bretagne : enseignements d'une analyse de terrain. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.42-53. [10.17180/ciag-2025-vol106-art04](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art04)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



Le projet Feder'Acteurs : choisir des méthodologies chemin-faisant pour diagnostiquer, concevoir et évaluer les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire : l'exemple de l'AOP Chaource

Solène PISSONNIER¹, Myrto PARMANTIER², Julie MENADI³, Marine SCHMITT⁴

¹ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SADAPT, Palaiseau, France

² INRAE, UMR Innovation, Montpellier, France

³ ACTA, Paris, France

⁴ Syndicat AOP Chaource, Vaudes, France

Correspondance : solene.pissonnier@agroparistech.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art05>

Résumé

Le Syndicat de l'AOP (Appellation d'Origine Protégée) Chaource est confronté à une diversité d'enjeux qui l'amène à vouloir renforcer les interactions cultures-élevage sur le territoire. Le syndicat et AgroParisTech ont travaillé ensemble pour comprendre les interactions déjà présentes et les renforcer. Un travail de diagnostic, conception et évaluation a été mis en œuvre collectivement en vue d'identifier les types d'interactions cultures-élevage et de construire des projets collectifs à l'échelle du territoire. Nous montrons ici comment les méthodologies ont été choisies et mises en œuvre, quels sont les résultats et les problématiques qui en découlent, liées à la difficulté d'articuler une diversité d'acteurs et d'objectifs à l'échelle du territoire.

Mots-clés : territoire ; diagnostic sociotechnique ; ateliers KCP ; outil de simulation

Abstract: The Feder'Acteurs project: choosing methodologies along the way to diagnose, design, and evaluate crop-livestock interactions at the regional level: the example of Chaource PDO

The AOP Chaource Union faces a variety of challenges, which lead it to reinforce crop livestock interactions at the territory level. The AOP union and AgroParisTech have worked together to understand and strengthen existing interactions. Diagnosis, design and evaluation work was carried out collectively to identify the types of crop-livestock interactions and build collective projects on a territorial scale. We show here how the methodologies were chosen and implemented, what the results and the problems that arose from them, linked to the difficulty of articulating a diversity of actors and objectives on a territory-wide scale.

Keywords: territory ; sociotechnical diagnosis ; KCP workshops ; simulation tool

1. Introduction

Recoupler cultures et élevage permet de bénéficier de nombreux avantages économiques, sociaux, agronomiques et zootechniques. Martin *et al.*, (2016) montrent que ces associations permettent de diversifier les systèmes de cultures en intégrant plus de légumineuses, de maintenir des prairies permanentes ou temporaires, de développer les couverts. Cette diversité permet de bénéficier de services écosystémiques liés au maintien de la fertilité des sols, ou encore des services de régulations des bioagresseurs (Bonaudo *et al.*, 2014). La réorganisation spatiale concertée entre les animaux, les prairies et les cultures peut également faciliter le développement de marchés locaux diversifiés (Havet *et al.*, 2014 ; Wilkins, 2008), de partager les risques entre les exploitations, de développer leur capacité d'adaptation et donc la résilience individuelle des fermes (Darnhofer *et al.*, 2010). Les exploitations dépendent moins des fluctuations des marchés internationaux (Peyraud *et al.*, 2014). De la même manière, le développement de synergies et complémentarités entre les fermes constitue une



opportunité pour partager d'autres ressources comme de la main d'œuvre et créer ainsi une dynamique sociale dans les territoires (Asai and Langer, 2014).

Cela dit, la mise en place d'interactions cultures élevage à l'échelle du territoire reste complexe car elle implique une diversité d'acteurs allant au-delà du collectif d'éleveurs. Peu de méthodologies visant à diagnostiquer, concevoir ou évaluer les systèmes à cette échelle existent (Moojen *et al.*, 2022). De rares méthodes de conception visant à développer des scénarios d'échanges entre céréaliers et éleveurs ont été développées, comme la méthode DYNAMIX basée sur des ateliers participatifs et de la modélisation (Ryschawy *et al.*, 2022).

Via leur cahier des charges, les AOP (Appellation d'Origine Protégée) peuvent favoriser ou freiner les transitions et les changements de pratiques (Ruggieri *et al.*, 2023). Elles constituent donc un terrain d'étude intéressant pour la thématique des interactions cultures-élevage, en particulier les AOP fromagères, qui cherchent à renforcer leur autonomie et le lien au territoire. Des études récentes en France au Pays Basque (Moraine *et al.*, 2024), en Savoie avec l'AOP Tome des Bauges (Pachoud and Koop, 2024) ou encore dans le Forez avec l'AOP Fourme de Montbrison (Etienne *et al.*, 2024, et Derrat *et al.*, 2022) ont permis de développer des cadres, des méthodologies et des connaissances sur la manière de décrire, analyser et accompagner ces systèmes dans leurs changements de pratique. Peu de travaux portent pourtant sur l'analyse des interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire au sein de ces AOP. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour creuser les freins et leviers au développement de ces systèmes, mais également pour mieux identifier quelles sont les méthodologies adaptées à ces systèmes et échelles complexes.

Nous proposons dans cet article de présenter les résultats d'un projet mené sur quatre ans entre AgroParisTech et le syndicat de Défense du Fromage de Chaource (l'Organisme de Défense et de Gestion du fromage de l'AOP Chaource), situé à cheval entre l'Aube et l'Yonne. Nous présenterons les méthodologies de diagnostic, conception et évaluation utilisées visant à analyser et renforcer les interactions cultures élevage à l'échelle du territoire. Nous analyserons les résultats qu'elles ont permis d'obtenir et nous reviendrons sur leurs limites et la manière de palier aux difficultés rencontrées.

2. Méthode

2.1. Le territoire de l'AOP Chaource et le développement du partenariat scientifique

Le Chaource² est un fromage AOP au lait de vache, à pâte molle et croûte fleurie produit entre l'Aube et l'Yonne. Le territoire de l'AOP est très hétérogène d'un point de vue pédologique. Il comporte notamment la Champagne Crayeuse (propice à la culture de céréales avec des sols argilo-calcaires, crayeux et limoneux) et la Champagne Humide (sols argileux ou sableux hydromorphes où l'élevage est dominant grâce aux prairies présentes). Les éleveurs de l'AOP sont soumis à un cahier des charges qui impose des critères d'autonomie : 75 % de la matière sèche de la ration doit provenir de l'exploitation et 85 % de la zone AOP. 30 % de la matière sèche des fourrages grossiers doit être de l'herbe (à tout moment) et au maximum 27 % de la ration totale peut provenir de concentrés. Le pâturage est obligatoire pendant 5 mois de l'année (20 ares par vache).

Le Syndicat a pour objectif de défendre les intérêts collectifs professionnels des différents acteurs de la filière (production, transformation, distribution et consommation). Il est chargé de contrôler le respect du cahier des charges et participe à des actions de communication. Le Bureau est présidé par le directeur de la principale fromagerie produisant du Chaource. Il est accompagné par trois vice-présidents (deux éleveurs et un fromager), un trésorier (affineur) et une secrétaire (éleveuse). Sept membres ordinaires

² En 2020, au moment où le projet démarre, le lait de l'AOP est produit par une soixantaine d'élevages et est traité par cinq collecteurs, quatre fromagers, un affineur et deux exploitations en transformation fermière. Une fromagerie principale transforme 80 % des volumes de lait. Le taux de transformation (quantité de lait effectivement transformée en Chaource) sur la zone est de 46 %



complètent le bureau, essentiellement des éleveurs. Des réunions sont organisées tous les mois afin de discuter des contrôles, projets et actions en cours. Les décisions pour l'AOP y sont prises de manière collective. Généralement, il est difficile de mobiliser l'ensemble des éleveurs lors des événements organisés par le syndicat. Une dizaine d'éleveurs est véritablement impliquée dans le fonctionnement de l'AOP.

En 2018, le syndicat de l'AOP participe à une réunion organisée par les RMT (Réseaux Mixte et Technologique) SPYCE (Systèmes de Polyculture-Elevage) et Fromages de Terroirs sur la thématique de l'autonomie des élevages. L'animatrice du syndicat de l'AOP a montré que les événements climatiques et économiques de ces dernières années (sécheresses, humidités, augmentation du coût des matières premières et de l'énergie) ont eu des impacts importants sur les rendements et les résultats économiques des fermes de l'AOP. Le développement d'interactions cultures-élevage est alors présenté par l'animatrice comme une des solutions possibles pour limiter ces impacts, renforcer l'autonomie des fermes et du territoire et à plus long terme maintenir l'élevage sur le territoire. Une enseignante chercheuse d'AgroParisTech présente à cette réunion et travaillant sur la thématique des interactions à cette échelle lui propose alors de monter un projet (nommé Feder'Acteurs) faisant converger leurs intérêts pour cette thématique et visant à répondre à la question suivante : comment développer les interactions cultures élevage à l'échelle du territoire ? Cette question a été découpée en différentes sous questions par l'équipe de recherche constituée par la suite autour du projet et l'animatrice : (i) quelles sont les interactions cultures élevage déjà présentes sur le territoire et quels sont les freins et leviers à leur développement ?, (ii) quelles interactions renforcer ou développer pour l'autonomie territoriale et par quelle méthodologie ?, (iii) quelles méthodes mobiliser ou créer pour diagnostiquer, concevoir et évaluer ces interactions ? Le travail a été guidé par la volonté d'ouvrir à l'ensemble des acteurs du territoire, car les interactions cultures élevage ne concernent pas que les éleveurs. Elles concernent les acteurs des filières végétales, mais également les acteurs susceptibles de fournir un appui ou un soutien (organisationnel, matériel, financier...) au développement de ces interactions. L'objectif était donc de se décentrer de la filière Chaource et de mettre en place des méthodes permettant d'ouvrir le projet à l'ensemble des acteurs du territoire pour mieux comprendre leur rôle à jouer dans le développement d'interactions. Les méthodologies mise en place au cours du projet ont été proposées par l'équipe de recherche puis validées et adaptées avec l'animatrice et le bureau du syndicat de l'AOP. L'équipe de recherche a réalisé une revue bibliographique des méthodologies à l'échelle du territoire. L'animatrice et le bureau du syndicat de l'AOP ont ensuite accepté, refusé ou proposé des adaptations en fonction des caractéristiques du territoire. Les choix pour une étape donnée dépendaient également des résultats de l'étape précédente (nouveaux objectifs, nouveaux acteurs à impliquer par exemple), dans la logique d'un processus « chemin-faisant ».

2.2. Réaliser un diagnostic socio technique pour comprendre les interactions cultures élevage sur le territoire et identifier les freins et leviers à leur développement

L'équipe de recherche a proposé de mettre en place la méthode du diagnostic socio-technique (DST) qui vise à identifier les freins et leviers sociotechniques à un processus d'innovation (ici le développement des interactions cultures élevage) (Casagrande *et al.*, 2023). Cette méthode semblait être adaptée au contexte car : (i) elle permet de mettre en lien les aspects techniques et organisationnels, qui sont au cœur du fonctionnement des interactions cultures-élevage, (ii) elle oriente vers le développement d'innovations et permet ainsi d'amorcer la phase de conception prévue en deuxième phase du projet pour renforcer les interactions, (iii) elle permet de prendre en compte une diversité d'acteurs et est utilisée à des échelles territoriales (e.g : travaux de Belmin *et al.* (2018) à l'échelle de l'AOP Clémentine de Corse). L'animatrice et le syndicat ont donc validé cette méthodologie. Les étapes mises en place sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Etapes du DST et rôle des différents acteurs du projet.



Etapes : objectif et déroulement	Personnes du projet impliquées
Etape 1 : définition de l'objectif général et de la problématique rencontrée par les acteurs	Toute l'équipe du projet (animatrice, équipe de recherche, bureau du syndicat de l'AOP)
Etape 2 : sélection des acteurs à enquêter. Cette étape permet de faire ressortir les déterminants des pratiques et les réseaux en jeu en caractérisant le positionnement des acteurs vis-à-vis des interactions cultures élevage. Des guides d'entretien spécifiques ont été construits pour chaque type d'acteur	Le bureau du syndicat de l'AOP et l'animatrice ont fourni une liste des partenaires territoriaux et des acteurs de la filière. La liste a été complétée au fur et à mesure des enquêtes. Les guides d'entretien ont été réalisés par l'équipe de recherche et validés par l'animatrice. Les enquêtes ont été réalisées majoritairement par l'équipe de recherche, certaines enquêtes ont été accompagnées par l'animatrice
Etape 3 : co-construction d'une typologie des interactions cultures élevage, positionnement des acteurs par rapport aux différents types et identification des déterminants des pratiques (techniques, cognitifs, économiques, politiques, sociaux).	Equipe de recherche et animatrice à partir des résultats d'enquêtes et des connaissances de l'animatrice
Etape 4 : restitution du DST. L'objectif était de présenter les résultats et de recueillir les remarques des participants pour compléter nos travaux, préparer la phase de conception et définir un ou plusieurs premiers objectifs communs pour le territoire. Elle a réuni 29 participants (Tableau 2). La journée comprenait deux temps : présentation des résultats, ateliers par groupe pour réfléchir aux ambitions du collectif pour le territoire. Pour toucher plus d'éleveurs, des restitutions intermédiaires ont été organisées lors des réunions du bureau du syndicat de l'AOP et lors de l'AG de l'AOP qui s'est déroulée en mars 2021.	Invités : acteurs du territoire et de l'AOP ayant été ou devant être enquêtés (ayant été disponibles ou non) La restitution a été co-organisée à Chaource en Janvier 2021 par l'équipe de recherche, l'animatrice et le bureau du syndicat L'animatrice et les personnes du bureau ont participé aux ateliers du deuxième temps, l'équipe de recherche a animé ces ateliers.
Etape 5 : des enquêtes complémentaires ont été réalisées auprès des coopératives et des entreprises d'alimentation animale. Au total 70 enquêtes ont été réalisées.	Equipe de recherche et l'animatrice

2.3. Organiser un atelier de co-conception à partir des résultats du diagnostic

L'équipe de recherche a ensuite proposé d'organiser un atelier de co-conception à l'échelle du territoire suite à la restitution du DST, selon les règles de la méthode KCP : Knowledge, Concept, Propositions. Cette méthode est basée sur la théorie CK (Concept – Knowledge), une méthode de conception innovante qui repère les blocages des acteurs (appelés effets de fixation) et leurs besoins d'apprentissage pour générer des alternatives adaptées (Hatchuel and Weil, 2009). Cette méthode était adaptée à notre situation car elle combinait les caractéristiques suivantes : (i) elle est utilisée dans des contextes où il existe de potentielles tensions ce qui est le cas par exemple entre céréaliers et éleveurs, (ii) elle permet de mobiliser une diversité d'acteurs, même quand ceux-ci sont « bloqués », ce qui était le cas sur le territoire d'étude, (iii) elle permet ainsi de libérer la pensée et favoriser la création de projets collectifs communs (comme les interactions cultures-élevage) et partager des connaissances,



(iv) elle est utilisée quand l'objet à construire n'est pas connu à l'avance, or notre analyse préalable n'a pas permis d'identifier de solution précise ou d'outils à utiliser, il était donc important de mobiliser une méthode qui permettrait de travailler avec un large champ des possibles, (v) la Phase «P» (Propositions) de la méthode KCP ajoute une dernière étape qui permet d'amener les participants à proposer des actions concrètes, une attente forte des agriculteurs.

Le bureau du syndicat et l'animatrice ont validé la méthodologie mais avec quelques réserves, craignant que les tensions pré-existantes entre certains acteurs se cristallisent au cours de l'atelier et que les objectifs s'éloignent de ceux de l'AOP. L'équipe de recherche et l'animatrice ont donc préparé ensemble l'atelier et se sont prêtés à l'exercice de co-conception en amont pour se préparer aux éventuelles difficultés et pour anticiper des effets de fixations. Un guide d'animation a été rédigé à partir de cet exercice, afin de mettre à plat les grands principes à suivre pour animer : veiller à la bonne distribution de la parole, éviter les digressions, relancer les discussions (grâce aux idées évoquées lors de la préparation en amont), faire expliciter les idées si elles ne sont pas claires ou pas partagées. Ces projets auraient été accompagnés et suivis par l'équipe de recherche. Cet atelier s'est déroulé le 6 avril 2022. Les 22 acteurs qui étaient présents sont listés dans le tableau 2. Le matin, deux visites de fermes biologiques (non AOP) ont eu lieu. Cette visite avait pour objectif de montrer aux participants un exemple de fermes travaillant en forte interaction, alimentant ainsi les réflexions pour les travaux de groupe l'après-midi. L'après-midi avait lieu l'atelier de conception. Les premières idées énoncées par les participants au cours de la restitution du DST ont été retravaillées pour aboutir aux concepts initiaux suivants : « Chaource, un territoire autonome sans importation de matière première » et « Partager pour collaborer et mieux vivre ensemble ». Les participants ont été répartis en deux groupes pour travailler ces deux concepts. Chaque groupe était accompagné par deux animateurs. L'objectif était de remplir des fiches Projets à la fin de l'atelier, en identifiant clairement les objectifs à poursuivre, les acteurs concernés, les étapes à mettre en place et les moyens disponibles, les freins potentiels (notamment les connaissances manquantes) et les leviers à actionner.

Tableau 2 : Liste des acteurs présents aux ateliers

Restitution du DST	Atelier kcp
L'animatrice du syndicat et le président, 9 éleveurs AOP (dont les éleveurs du bureau du syndicat), 1 céréalier, 1 éleveur hors AOP, 2 entreprises d'alimentation animale, la SAFER, le Syndicat de bassin versant, le Groupe Action Local (GAL) Othe Armance, 2 conseillers de la chambre de l'Aube, 1 élu président du Pôle d'Equilibre Territorial et Rural Othe Armance (PETR)	L'animatrice du syndicat, 9 éleveurs AOP (dont 4 étaient présents à la restitution du DST), 1 céréalier, 1 éleveur hors AOP, 1 coopérative céréalière, 2 animateurs du GAL Othe Armance, 1 animatrice du PNR, 1 représentante de la filière luzerne (usine de déshydratation), 2 conseillers des chambres d'agriculture de l'Aube et de l'Yonne, 1 animateur de CUMA, 2 conseillers en élevage

2.4. Construire un outil de scénarisation pour alimenter les échanges entre céréaliers et éleveurs

Suite à l'atelier KCP, le bureau du syndicat et l'animatrice n'ont plus souhaité participer à des ateliers de co-conception, les résultats ayant été trop éloignés de leurs attentes (cf section résultats). L'ensemble de l'équipe du projet a donc décidé de se recentrer sur des problématiques concernant plus directement les éleveurs et les céréaliers et non plus l'ensemble des acteurs du territoire. Les éleveurs du bureau du syndicat ont exprimé le besoin d'échanger directement sur des rations et des assolements avec les céréaliers. L'équipe de recherche a donc proposé de construire un outil de scénarisation permettant de simuler différentes rations pour les vaches laitières et les surfaces nécessaires pour ces rations. Les rations peuvent être optimisées pour avoir un maximum d'autonomie territoriale (aliments provenant de la zone AOP, en lien avec les critères du cahier des charges), un coût de production minimal, ou un



nombre d'heures travaillées minimal. L'objectif de cet outil est de pouvoir simuler différents scénarios qui alimenteront les discussions entre éleveurs et céréaliers, pour par exemple identifier qui produit quelles cultures en fonction des besoins alimentaires des vaches laitières, ou à l'inverse, quelles adaptations de la ration sont nécessaires en fonction des cultures présentes sur le territoire. Les simulations sont réalisées pour une ferme Chaourçoise moyenne qui cultive 100 ha et élève 68 vaches laitières. Le choix de travailler sur une ferme générique permettait d'éviter un affichage individuel qui aurait freiné les éleveurs, soucieux de ne pas partager leurs chiffres. La consommation des génisses et veaux n'est pas prise en compte dans l'outil. Les paramètres et variables de l'outil sont représentés dans la Figure 1.

Une concertation avec le bureau du syndicat de l'AOP a permis de confirmer leur intérêt pour l'outil et d'identifier les thématiques d'intérêt à scénariser : augmentation de l'autonomie protéique à l'échelle de la zone AOP et l'adaptation aux aléas climatiques. Des entretiens complémentaires ont été menés avec trois céréaliers afin d'identifier les ressources qui les intéressent et qu'ils souhaiteraient intégrer dans leur assolement. Ces entretiens ont également permis d'ajuster l'outil de scénarisation afin que les variables de sorties soient également intéressantes pour eux. Suite à ces entretiens, les scénarios suivants ont été retenus : augmentation de la luzerne zone AOP, suppression du soja et intégration du pois dans la ration. Des entretiens ont été menés avec des conseillers en élevage et en production végétale, des acteurs de la filière luzerne et des instituts techniques pour calibrer l'outil avec des données adaptées au contexte.

Nous avons ensuite constitué un petit groupe de travail constitué d'un polyculteur-éleveur, 2 céréaliers et 4 éleveurs de l'AOP. L'objectif de ce groupe de travail était de discuter des résultats du scénario et ainsi d'identifier des freins et leviers à la création de partenariats concrets entre éleveurs et céréaliers. Cet atelier s'est tenu en mai 2023. Des documents ont été préparés en amont pour alimenter les échanges, en lien avec le scénario discuté, par exemple des fiches techniques sur l'intégration du pois toasté dans des rations. Les leviers mentionnés au cours de l'atelier pour développer des partenariats ont été creusés (recherche bibliographique, calculs économiques, fiches ...) par la suite et présentés aux éleveurs de l'AOP fin août 2023, réunissant une quinzaine de personnes (éleveurs, fromageries, chambre d'agriculture, conseillers élevage...). Toutes ces étapes de paramétrage de l'outil, réalisation des enquêtes et organisation de l'atelier ont été menées par l'équipe de recherche et validées au fur et à mesure par l'animatrice, avec qui les échanges étaient hebdomadaires sur cette période. Elle a ainsi pu valider la structure de l'outil, contribuer à chercher des références pour le paramétrer (auprès de la Chambre Grand Est et du conseil élevage), réaliser certaines enquêtes avec l'équipe de recherche, recueillir des témoignages auprès d'autres éleveurs pour alimenter les scénarios. L'équipe de recherche s'est chargée de préparer la simulation des scénarios avec l'outil et de préparer l'animation de l'atelier.

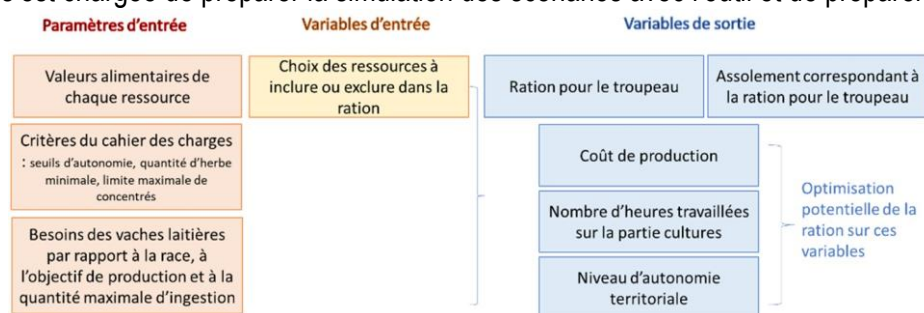


Figure 1 : Paramètres et variables de l'outil de simulation

3. Résultats

3.1. Trois grands types d'interactions cultures-élevage

Nous avons identifié trois grands types d'échanges qui coexistent sur le territoire de l'AOP. Le premier type concerne **les filières tracées** d'alimentation animale pour la pulpe de betteraves et la luzerne. Il



s'agit de tracer ces parcelles de luzerne et betterave situées sur l'aire de l'AOP et de centraliser les récoltes dans une usine de transformation (sucrierie ou usine de déshydratation) pour ensuite redistribuer les produits ou coproduits aux éleveurs de la zone. Les éleveurs bénéficient ainsi d'une facture utilisable pour le calcul de leur autonomie territoriale lors des audits. Pour être impliqués dans ces filières, les éleveurs doivent avoir une demande stable et régulière sur le long terme, ce qui n'est pas le cas de tous. Le syndicat de l'AOP souhaite développer d'autres filières tracées car elles leur permettent d'avoir une traçabilité lors des audits. Il souhaite développer d'autres filières comme par exemple pour le tourteau de colza, ce qui permettrait de bénéficier de concentrés locaux et de réduire la dépendance au soja importé. Cela dit, les volumes nécessaires semblent trop petits pour intéresser les usines de trituration du territoire. Ces filières sont freinées par le fait que tous les éleveurs ne peuvent pas y accéder. Le développement de la méthanisation offre également des débouchés plus rémunérateurs pour les pulpes de betterave.

Nous avons également identifié **les échanges « multilatéraux »**. Il s'agit de céréaliers ayant investi dans une presse et centralisant le foin et/ou la paille pour les revendre. Ces céréaliers, appelés « pailleux », vendent la paille et le foin pressés aux éleveurs de la zone AOP mais surtout à d'autres éleveurs situés en dehors du territoire (plus offrants). Ces échanges sont freinés par le développement de l'Agriculture de Conservation des Sols sur le territoire où la paille est broyée, enfouie et non récoltée. Ces échanges créent de nombreuses tensions. La vente de la paille et de foin en dehors du territoire suit une logique de marché international et ne priorise pas la solidarité locale entre éleveurs et céréaliers.

Enfin, nous avons identifié **les échanges « bilatéraux »**. Il en existe une multitude sur le territoire. Ils n'impliquent que deux exploitations distinctes et l'échange d'une matière première (luzerne, trèfle, herbe, maïs...) contre de l'argent ou du fumier, ou même contre l'accès à des primes MAEC nécessitant une charge minimale d'animaux sur une parcelle. Ces échanges, souvent de longue date, sont considérés comme « gagnant-gagnant ». Les échanges de maïs et de paille semblent être plus compliqués car le rendement et donc la disponibilité sur le territoire peuvent être très variables. La demande et l'offre ne coïncident donc pas toujours selon les années, rendant difficile le développement de partenariats de confiance et pérennes. Ces échanges bilatéraux sont freinés par la diversification des céréaliers vers de l'alimentation humaine et la méthanisation, dont les débouchés sont plus rémunérateurs et plus stables. De plus, les éleveurs ne vendent pas toujours leur fumier ou lisier pour rester autonome en fertilisation azotée.

Les freins et leviers au développement des différents types d'interactions apparaissent à différentes échelles : l'exploitation agricole (stockage de certaines ressources comme le fumier, demande irrégulière) mais aussi à l'échelle des filières et des dynamiques territoriales (développement de l'agriculture de conservation et de la méthanisation...). Les freins peuvent être organisationnels, sociaux (existence de tensions entre acteurs) ou économiques (favorisation des débouchés rémunérateurs).

3.2. Un premier atelier de co-conception territoriale mitigé

La visite des deux exploitations au cours de la matinée a permis aux acteurs de partager des connaissances sur des aspects techniques et organisationnels. Les discussions portaient à la fois sur le fonctionnement et les pratiques des exploitations, mais également sur les caractéristiques des échanges entre les fermes.

Les fiches Projets issues de l'atelier de l'après-midi sont résumées dans le tableau 2. Les participants ont eu des difficultés pour se concentrer sur les thèmes proposés. Des sous-groupes se sont rapidement formés, engendrant ainsi des discussions multiples en parallèle. Dans les deux groupes, il a donc été difficile de remplir de manière complète les fiches Projet. Les idées ne faisaient pas toujours consensus et les acteurs n'ont pas souhaité s'engager concrètement. Il a été difficile pour les acteurs non éleveurs de se projeter car les projets proposés étaient centrés autour des problématiques des éleveurs et ne constituaient pas un projet de territoire. Dans les deux groupes, les discussions



amenait à des débats sur la refonte du cahier des charges dont les critères d'autonomie peuvent être difficiles à atteindre. Ces projets témoignent de la difficulté pour les éleveurs de trouver des marges de manœuvre et de faire évoluer leur système. Un éleveur a également soulevé la difficulté de se mettre d'accord au sein de l'AOP et de définir une direction commune. Les participants ont regretté l'absence de céréaliers à cette journée. Le fait d'organiser les événements avec un syndicat d'AOP, qui défend les intérêts des éleveurs, a certainement empêché les céréaliers de se projeter, notamment car certaines tensions entre les deux professions existent.

Le bureau du syndicat de l'AOP s'est réuni quelques semaines après l'atelier et a décidé de ne plus participer à des ateliers collectifs à l'échelle du territoire. Les propositions de « projets » ci-dessous n'ont donc pas été creusées mais d'autres acteurs ont pu s'en saisir comme le montre le tableau 3.

Tableau 3 : Projets développés dans les groupes lors de l'atelier de conception

	« Chaource, un territoire autonome sans importation de matière première »	« Partager pour collaborer et mieux vivre ensemble »
Projet 1	<u>Valorisation de la filière tracée luzerne</u> Constat : la filière tracée est sous exploitée en termes de volume Objectif : mieux identifier les parcelles potentielles, proposer des nouvelles formes de luzerne (balles, humide, feuille), chiffrer les coûts associés. Freins : manque de références technico économiques sur les performances attendues	<u>Foire aux fromages à Chaource / Confrérie du Chaource</u> Constat : le Chaource n'est pas assez connu, le taux de transformation est trop faible Objectif : promouvoir le produit afin d'augmenter la consommation et donc la rémunération des éleveurs. Mobilisation des éleveurs retraités qui pourraient participer à différents événements de promotion. Ouvrir à d'autres productions locales afin de valoriser plus globalement l'agriculture sur le territoire Frein : impact local seulement, moyens humains limités
Suites données	Réflexions reprises dans la suite du projet, un projet étudiant AgroParisTech s'est déroulé en 2025 sur la faisabilité de mise en place de la filière orge tracée	Organisation par le PETR de réunions pour développer des actions de communication et valorisation des produits et filières locaux (visites de fermes par exemple)
Projet 2	<u>Développement du soja dans le Grand-Est</u> Constat : besoin de protéines localement pour l'autonomie Objectif : développer une filière tracée ou l'autoconsommation des élevages : cartographier les parcelles potentielles, améliorer les itinéraires techniques, chiffrer les coûts et assurer la logistique pour récolter, stocker et distribuer. Freins : la zone AOP n'est potentiellement pas une zone propice à la culture du soja	<u>Education des jeunes</u> Constat : déconnexion entre les citoyens et les problématiques agricoles, les éleveurs souffrent des reproches et injonctions Objectif : reconnecter l'agriculture avec les citoyens, afin qu'ils puissent mieux comprendre les caractéristiques du métier, les contraintes et leur rôle dans leurs choix de consommation futurs. Cette idée se concrétiserait par exemple par des interventions d'éleveurs dans les écoles Frein : impact local seulement, disponibilité des éleveurs
Suites données	Thématique abordée par le projet ARPEEGE ³ . La zone AOP Chaource ne réunit pas les conditions	Pas de suite

³ Autonomie en Ressources Protéiques et Energétiques des élevages du Grand Est



	pédoclimatiques nécessaire à la culture ⁴ .	
--	--	--

3.3. Un outil de simulation recentré sur les éleveurs et les céréaliers

L'atelier de conception du 6 avril a permis aux éleveurs de comprendre qu'ils souhaitaient revenir à des données quantitatives et être mis en lien direct avec des céréaliers pour pouvoir discuter d'échanges de matières. Les entretiens réalisés en amont auprès des céréaliers ont montré l'importance de se baser sur des indicateurs économiques pour discuter des échanges, de comprendre le fonctionnement et les contraintes des éleveurs, d'envisager des échanges à la fois formels et informels, mais aussi de pouvoir s'engager sur des volumes, des fréquences et des prix. Le jour de l'atelier, un premier tour de table a permis de montrer que tous les participants, y compris les céréaliers, voyaient un véritable intérêt à développer des coopérations, notamment pour maintenir l'élevage et donc des produits locaux de qualité sur le territoire. Au cours des discussions, les niveaux d'autonomie imposés par le cahier des charges ont été débattus et considérés comme élevés. Des discussions ont aussi amené à la question de la révision du cahier des charges, comme lors de l'atelier précédent.

Le scénario préparé en amont a ensuite été présenté. Les résultats des simulations montrent que le tourteau de soja est indispensable pour satisfaire les besoins des vaches laitières et les critères du cahier des charges (27 % de concentrés au maximum), à moins d'ajouter du pois protéagineux. Suite à la présentation de ce scénario, les éleveurs et céréaliers ont discuté des ressources pouvant être échangées : la première coupe de luzerne porte graine des céréaliers pourrait être vendue aux éleveurs. Le maïs a également été identifié comme une ressource potentielle car pour les céréaliers, c'est une culture qui permet de casser les cycles des adventices. Le maïs est récolté tôt et laisse la parcelle propre. Les céréaliers souhaitaient savoir si le pois protéagineux était suffisant d'un point de vue nutritif et si le toastage était nécessaire. Les éleveurs quant à eux ont questionné les céréaliers sur leurs contraintes agronomiques pour cultiver certaines ressources (e.g. : salissement des parcelles lorsque la luzerne revient trop régulièrement dans la rotation).

Les conversations au cours de l'atelier ont permis d'identifier plusieurs leviers pour favoriser les interactions : (i) définir des prix d'échange selon la répartition des tâches entre les agriculteurs, notamment pour la luzerne, (ii) mettre en relation les agriculteurs au sein d'un collectif et animer ce collectif, (iii) identifier et quantifier les besoins des éleveurs à l'échelle de l'AOP (quels besoins pour quelles ressources). Suite à l'identification de ces leviers, l'équipe de recherche a développé un tableau de prix d'échange de la luzerne en fonction de différentes conditions (type de sol, sur pied, bout de champ, fauchée par l'éleveur ou par le céréalier). Ensuite, une fiche a été rédigée pour créer un groupe WhatsApp entre céréaliers et éleveurs. Cette fiche établit le cadre, les objectifs et le fonctionnement du groupe. La fiche a été distribuée aux éleveurs et le groupe WhatsApp a été créé au printemps 2024 mais par manque de temps, l'animatrice de l'AOP ne peut animer la discussion sur le groupe. Il n'y a donc pas d'échanges sur la conversation.

4. Discussion

4.1. Maintenir de bonnes relations entre partenaires de terrain et scientifiques au cours des années

Le projet Feder'Acteurs a permis de réunir des intérêts communs sur la question des interactions cultures-élevage. Pour traiter ce sujet, l'équipe du projet a mis en place un processus « chemin-faisant », qui permet d'accompagner les acteurs sur un temps long en adaptant les méthodologies. Ce type de processus est nécessaire pour accompagner les transitions qui sont aujourd'hui complexes

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=DS8YbF2jk7c&t=4s>



(Simon *et al.*, 2023). L'équipe de recherche porte des questions scientifiques sur le fonctionnement des systèmes cultures-élevage et les méthodologies à mobiliser. Ces questions trouvent un écho concret au sein de l'AOP qui cherche à renforcer les partenariats avec les acteurs des autres filières et les liens éleveurs-céréaliers en vue de renforcer l'autonomie territoriale permettant de respecter le cahier des charges et indirectement maintenir l'élevage sur le territoire. Cet intérêt commun, l'utilisation de moyens mutuels (stagiaires par exemple) et la présence régulière sur le terrain de l'équipe de recherche a permis de créer des liens solides entre partenaire scientifique et partenaire de terrain. De même, l'implication du partenaire de terrain tout au long de ce processus « chemin-faisant » (choix méthodologique, relecture des guides d'entretien, réalisation conjointe de certaines enquêtes, validation des résultats, co-organisation des ateliers, appui sur les aspects logistiques) était indispensable pour le bon déroulement du partenariat (Simon *et al.*, 2017). L'équipe de recherche étant spécialisée sur les questions de conception à l'échelle du territoire et ayant accès à une diversité de ressources (bibliographie, témoignages, guides d'animation, etc...), elle s'est directement positionnée en force de proposition sur les questions méthodologiques, tout en attendant une validation des partenaires de terrain, et une adaptation aux caractéristiques du territoire et des acteurs impliqués. Cela dit, les méthodologies proposées pour les étapes de diagnostic et conception impliquent de devoir se décentrer des problématiques uniquement « filière », pour s'ouvrir à d'autres acteurs potentiels mais pouvant avoir d'autres objectifs parfois orthogonaux à ceux de la filière Chaource. Ce décentrage a pu être mal perçu par les partenaires de terrain, qui doivent face à des enjeux individuels économiques importants (au niveau des filières mais aussi des exploitations). Il y avait donc parfois un décalage entre les attentes des éleveurs et celles de l'équipe de recherche. Les éleveurs attendent que les chercheurs leur apportent des solutions efficaces et mobilisables rapidement pour répondre à ces difficultés. Or, les approches développées par l'équipe de recherche prennent du temps. Elles nécessitent une phase de collecte de données longue, plusieurs ateliers, et n'ont pas toujours des impacts concrets et directs (Lequin *et al.*, 2024). De plus, l'équipe de recherche souhaite répondre à des questions de recherche larges, qui sont généralement traitées sur le long terme et parfois sur plusieurs territoires

4.2. Intérêts et limites des méthodologies mobilisées

Dans les projets portant sur les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire, on peut constater deux tendances : (i) l'adaptation de méthodologies pré-existantes empruntées à d'autres cadres et disciplines, (ii) la création de méthodes spécifiques. Dans les deux cas l'objectif est de prendre en compte à la fois les aspects techniques et organisationnels, et la diversité d'acteurs impliqués (Pissonnier, 2025, à paraître). Dans ce projet, les méthodologies de diagnostic et de conception sont des méthodologies pré existantes, qui ont été choisies car elles prennent en compte la diversité des acteurs et la complexité des problématiques à traiter. Elles incluent les différentes composantes d'un territoire : les espaces, les ressources, les activités et les acteurs (Deffontaines *et al.*, 2006). La méthodologie du DST a permis d'atteindre nos objectifs en identifiant différents types d'interactions cultures-élevage, le positionnement et le rôle des acteurs du territoire dans ces interactions, et enfin elle a permis d'identifier les types de freins et leviers à leur développement (à l'échelle de l'exploitation, des filières, du territoire). La méthode nous semble donc bien adaptée à une diversité de thématiques et de contextes (Casagrande *et al.*, 2023). Les enquêtes et bilans réalisés à chaque étape avec les acteurs, ainsi que les discussions régulières avec le bureau du syndicat de l'AOP ont permis d'adapter chemin-faisant les différentes méthodologies, comme cela a été le cas dans les travaux de Etienne *et al.*, (2024). Ce type de démarche leur a par exemple permis d'adapter, voire d'écarter les jeux sérieux envisagés au cours du processus de conception.

La méthode KCP quant à elle, a permis d'explorer de nombreuses idées et de renforcer l'interconnaissance des différents acteurs du territoire. Cela dit, cette méthode ne nous a pas permis d'atteindre les objectifs fixés. Nous pensons que la principale difficulté était liée au manque de pré existence d'un collectif à l'échelle du territoire (Boussada *et al.*, 2024). Le projet a été initié avec le syndicat de l'AOP et non avec la diversité des acteurs du territoire impliquée dans les interactions



cultures élevages. Le collectif territorial n'était donc pas suffisamment constitué. Il était difficile pour eux de définir une direction commune lors des ateliers organisés, chacun ayant ses propres objectifs et ses propres contraintes. Le fait de ne pas avoir d'objet commun et clair à construire peut également constituer un frein, comme vu par Della Rossa *et al* (2022) dans leurs travaux à l'échelle d'un bassin versant pour réduire l'utilisation des pesticides. Une alternative possible aurait été de prendre plus de temps pour créer ce collectif et identifier des objectifs, avant de proposer de travailler directement sur des idées concrètes et de s'engager. Le dialogue territorial par exemple, semble être une alternative intéressante dans ce type de situation. Cette méthodologie regroupe un ensemble de pratiques de concertation et de médiation, qui permet de résoudre des problématiques complexes en prenant en compte la diversité des acteurs impliqués (Barret and Guihéneuf, 2012).

Enfin, l'outil d'évaluation construit pour alimenter les discussions entre céréaliers et éleveurs sur les rations et les assolements a été construit spécifiquement pour le territoire. Il a permis d'atteindre les objectifs car l'atelier organisé a abouti à des suggestions de leviers concrets pour développer des partenariats et ce malgré l'utilisation d'un cas générique pour les simulations et malgré le fait que l'idée de l'outil venait initialement de l'équipe de recherche. Des ressources ont également été identifiées pour des échanges potentiels. Cette phase d'évaluation quantitative permet d'alimenter et d'appuyer la phase de conception, en offrant des données chiffrées sur lesquelles débattre (Ryschawy *et al.*, 2022). Le débat permet ainsi de faire émerger de nouveaux freins et leviers, des propositions d'actions et des leviers concrets.

4.3. Développer des interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire : quelles motivations des acteurs et quelles conséquences sur l'implication des éleveurs ?

A l'échelle de l'AOP Chaource, les interactions mises en place ne permettent pas d'enclencher une transition agroécologique franche. Les motivations des acteurs mettant en place des interactions cultures élevage ne sont pas environnementales ou écologiques. Ces résultats complètent ceux de Meunier *et al.*, (2024), qui ont interrogé des agriculteurs pionniers ayant réintégré de l'élevage dans des zones spécialisées en grandes cultures. Les motivations sont diverses et peuvent être liées à des aspects sociaux, environnementaux, économiques, sociologiques. Nous montrons ici que pour un territoire spécialisé où l'élevage subsiste, les motivations des éleveurs sont essentiellement liées à des facteurs pédoclimatiques et économiques (augmentation du coût des matières premières et de l'énergie par exemple). De plus, nous avons pu remarquer au cours du diagnostic que la thématique des interactions cultures élevage n'intéressait pas l'ensemble des éleveurs de l'AOP, d'où leur présence réduite au cours des ateliers et des restitutions. Les éleveurs favorisent l'autonomie de leur propre exploitation et s'impliquent peu dans les événements organisés par le syndicat en général. Du fait de cette implication réduite, les éleveurs se sont peu saisis des solutions proposées (groupe WhatsApp, tableau de prix de la luzerne). Le bureau du syndicat a souhaité rebondir sur les discussions pour creuser les possibilités de développement d'une nouvelle filière tracée pour l'orge. Les premières enquêtes montrent que les éleveurs ne sont pas tous intéressés, une fois de plus pour des raisons d'autonomie à l'échelle de l'exploitation. Ce constat renforce donc le besoin d'articuler objectifs individuels et collectif.

Des étapes de construction du collectif « éleveurs de l'AOP » auraient été nécessaires, comme le montrent les travaux de Dérnat *et al.*, (2022). Ces étapes auraient permis de définir les objectifs communs et d'éviter la mise à l'écart de certains éleveurs. Dérnat *et al.*, (2022) mentionnent également que l'objectif de l'ODG ne correspond pas toujours aux objectifs des éleveurs. Les travaux de Hazard *et al.*, (2022) proposent une méthodologie permettant d'articuler les dimensions individuelles et collectives. Cette méthodologie est basée sur cinq étapes visant à clarifier les objectifs individuels, leurs impacts au niveau des exploitations, les « surprises » qui en découlent pour ensuite reboucler sur les questions collectives et leur organisation. La méthodologie permet ainsi de mieux coupler l'individuel et le collectif et aurait pu permettre dans notre cas de mieux se rendre compte de la diversité des objectifs des



éleveurs de l'AOP, et de la manière dont ils auraient pu être traités avec l'objectif global de l'AOP. Cette meilleure prise en compte en amont aurait pu permettre d'augmenter la participation des éleveurs aux ateliers.

5. Conclusion

Nous présentons ici plus de quatre années de partenariat visant à traiter la question des interactions cultures-élevage et des méthodologies à développer pour les renforcer à l'échelle d'un territoire AOP. Pour ce faire, un processus « chemin-faisant » a été mis en place entre les partenaires de terrain et le partenaire scientifique, permettant d'adapter sur le long terme différentes méthodologies de diagnostic, conception et évaluation. Ces trois phases se sont alimentées et les méthodologies choisies ont permis de décrire finement les types d'interactions présents sur le territoire, d'organiser des ateliers de co-conception à l'échelle du territoire et de faire dialoguer des éleveurs et des céréaliers via de la scénarisation, pour envisager des partenariats sous différentes formes. Cette expérience a permis de soulever différentes difficultés méthodologiques. L'échelle du territoire croisée avec l'échelle « filière AOP » implique de prendre en compte la diversité des objectifs et des attentes des différents acteurs et des partenaires du projet. L'étape de diagnostic a permis de faire état de cette diversité mais l'étape de conception n'a pas permis de converger vers un objectif commun pour l'ensemble des acteurs. L'étape d'évaluation est donc revenue sur un plus petit collectif avec des attentes plus homogènes, en se basant sur de la scénarisation. De futurs travaux sur d'autres territoires pourront alors porter sur une meilleure articulation de ces différentes étapes méthodologiques, visant à englober la diversité des attentes, objectifs et pratiques des acteurs.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

S.Pissonnier : <https://orcid.org/0000-0002-9668-6283>

M.Parmantier : <https://orcid.org/0009-0004-0911-2989>

Contributions des auteurs

Coordination du projet Feder'Acteurs, recherche de financements, encadrement des stagiaires et CDD : S.Pissonnier. Accès aux contacts et aux données, participation aux ateliers, réunions, restitutions : M.Schmitt, (animatrice depuis 2024) représentant également la participation de AL.Soullignac (animatrice jusqu'en 2024). Sur la partie DST et conception : conceptualisation, problématisation, préparation et participation aux enquêtes, réalisation de la bibliographie et des choix méthodologiques, co-animation d'ateliers et de restitutions, organisation de réunions, M.Parmantier, S. Pissonnier. Sur la partie simulation et évaluation : finalisation de l'outil, organisation des ateliers, restitution, formalisation des résultats, J.Menadi encadrée par S.Pissonnier

Déclaration d'intérêt



Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des stagiaires ayant travaillé sur ce projet (E. Duval, Y. Darbois, M. Hanne, J. Magadray, M. Levraud, M. Truffaut, V. Clerget, B. Roux, J. Heckly). Nous remercions l'ensemble des acteurs ayant participé au projet, notamment les éleveurs de l'AOP.

Déclaration de soutien financier

Les auteurs remercient la Direction de la Recherche, de l'Innovation et du Transfert Technologique d'AgroParisTech ainsi que le PPR BeCreative pour le financement de ces travaux

Références bibliographiques

- Asai, M., Langer, V., 2014. Collaborative partnerships between organic farmers in livestock-intensive areas of Denmark. *Org. Agric.* 4, 63–77. <https://doi.org/10.1007/s13165-014-0065-3>
- Barret, P., Guihéneuf, P.-Y., 2012. Guide pratique du dialogue territorial : concertation et médiation pour l'environnement et le développement local, Monde en cours. Éd. de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- Belmin, R., Meynard, J.-M., Julhia, L., Casabianca, F., 2018. Sociotechnical controversies as warning signs for niche governance. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 44. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0521-7>
- Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur. J. Agron.* 57, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- 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>
- Darnhofer, I., Bellon, S., Dedieu, B., Milestad, R., 2010. Adaptiveness to enhance the sustainability of farming systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 545–555. <https://doi.org/10.1051/agro/2009053>
- Deffontaines, J.-P., Benoît, M., Lardon, S. (Eds.), 2006. Acteurs et territoires locaux: vers une géoagronomie de l'aménagement, Savoir faire. Institut national de la recherche agronomique, Paris.
- Dernat, S., Etienne, R., Hostiou, N., Pailleux, J.-Y., Rigolot, C., 2022. Ex-post consequences of participatory foresight processes in agriculture. How to help dairy farmers to face outcomes of collective decisions planning? *Front. Sustain. Food Syst.* 6, 776959. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.776959>
- Etienne, R., Dernat, S., Rigolot, C., Ingrand, S., 2024. Dossier « L'évaluation des jeux sérieux sur les thématiques agro-environnementales, territoriales et alimentaires » – Évaluation et ajustement chemin faisant de la mobilisation de jeux sérieux afin d'accompagner les éleveurs dans leurs changements de pratiques. *Nat. Sci. Soc.* 32, 293–305.
- Gouy Boussada, V., Seguin, L., Malingrey, S., Armani, G., Barreteau, O., Leteurtre, E., Adoir, E., Luzi, H., Carluer, N., Grillot, J., Rabotin, M., Abrami, G., Lauvernet, C., 2024. Un jeu sérieux hybride centré sur le paysage peut-il favoriser l'émergence de leviers d'actions collectives pour concilier agriculture et qualité de l'eau ? *Innovations agronomiques* 96, 16-26. <https://doi.org/10.17180/CIAG-2024-VOL96-ART02>
- Hatchuel, A., Weil, B., 2009. C-K design theory: an advanced formulation. *Res. Eng. Des.* 19, 181–192. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Havet, A., Coquil, X., Fiorelli, J.L., Gibon, A., Martel, G., Roche, B., Ryschawy, J., Schaller, N., Dedieu, B., 2014. Review of livestock farmer adaptations to increase forages in crop rotations in western France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.009>
- Hazard, L., Locqueville, J., Rey, F., 2022. A facilitation method to foster collective action in transitions toward sustainable agriculture—a case study. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 106. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00838-9>
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J., 2017. How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Sci. Total Environ.* 586, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040>



- Lequin, S., Godon, M., Reboud, X., 2024. Typologie de leviers mobilisables à l'échelle d'un territoire pour réduire l'utilisation et les impacts des produits phytopharmaceutiques. *Innovations agronomiques* 96, 1-15. <https://doi.org/10.17180/CIAG-2024-VOL96-ART01>
- Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.-A., Asai, M., Sarthou, J.-P., Duru, M., Therond, O., 2016. Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>
- Meunier, C., Martin, G., Barnaud, C., Ryschawy, J., 2024. Bucking the trend: Crop farmers' motivations for reintegrating livestock. *Agric. Syst.* 214, 103820. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103820>
- Moojen, F.G., de Faccio Carvalho, P.C., dos Santos, D.T., Neto, A.B., Vieira, P.C., Ryschawy, J., 2022. A serious game to design integrated crop-livestock system and facilitate change in mindset toward system thinking. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00777-5>
- Moraine, M., Boiron, G., de Sartre, X. A., & Gasselin, P., 2024. Optimizing territorial resources to support agroecological transitions: which levers to adapt to climate change in livestock systems in South of France?. In *15th IFSA Conference, Systemic Change For Sustainable Future, Trapani, Italy*.
- Pachoud, C., & Koop, K., 2024. How to analyze sustainable territorial transformation? Applying the multidimensional perspective on territorial transformation to the Cœur des Bauges. *Géographie, économie, société*, 26(2-3), 301-323.
- Peyraud, J.-L., Taboada, M., Delaby, L., 2014. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review. *Eur. J. Agron.* 57, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.02.005>
- Pissonnier, S., 2025. Les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire : outils et méthodes pour accompagner leur développement, in: *Exploitations et Territoire*, Editions ISTE, à paraître.
- Ruggieri, F., Coulon-Leroy, C., Mazé, A., 2023. How Can Collective Action Support the Agroecological Transition in Geographical Indication Vineyards? Insights from the Loire Valley Wine Area. *Sustainability* 15, 9371. <https://doi.org/10.3390/su15129371>
- Ryschawy, J., Grillot, M., Charneau, A., Pelletier, A., Moraine, M., Martin, G., 2022. A participatory approach based on the serious game Dynamix to co-design scenarios of crop-livestock integration among farms. *Agric. Syst.* 201, 103414. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103414>
- Simon, S., Lesueur-Jannoyer, M., Plénet, D., Lauri, P.-É., Le Bellec, F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *European Journal of Agronomy* 82, 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.004>
- Simon, S., Clerc, P., Jonville, D., Rechauchere, O., Messéan, A., 2023. Conception des systèmes techniques agroécologiques : quels métiers, entre diagnostic, évaluation/conception et accompagnement? *AE&S* 12. <https://doi.org/10.54800/rdf569>
- Theau J.-P., Chabalière C., Piquet M., Cayre P., Delmas B., Violleau S., Farruggia A. 2012. Construire des outils en partenariat entre Recherche et Développement. *Le diagnostic des pratiques fourragères en zone fromagère AOP du Massif Central*, Fourrages, 209, 69-78
- Wilkins, R.J., 2008. Eco-efficient approaches to land management: a case for increased integration of crop and animal production systems. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363, 517–525. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2167>

Pour citer cet article : Solène Pissonnier, Myrto Parmantier, Julie Menadi, Marine Schmitt. Le projet Feder'Acteurs : choisir des méthodologies chemin-faisant pour diagnostiquer, concevoir et évaluer les interactions cultures-élevage à l'échelle du territoire : l'exemple de l'AOP Chaource. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.54-67. [10.17180/ciag-2025-vol106-art05](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art05)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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

Co-conception de scénarios de complémentarités culture-élevage pour la réduction des pesticides à l'échelle d'un territoire

Myrto PARMANTIER¹, Marc MORAINÉ¹, Rémy BALLOT², Lorène PROST³

¹ UMR Innovation, INRAE, 2, Place Pierre Viala, 34000 Montpellier, France

² UMR Agronomie, Campus INRAE - AgroParisTech 22 place de l'Agronomie 91120 Palaiseau, France

³ UMR SADAPT, Campus INRAE - AgroParisTech 22 place de l'Agronomie 91120 Palaiseau

Correspondance : myrto.parmantier@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art06>

Résumé

Les interactions entre culture et élevage sont une piste de réduction des pesticides à l'échelle des territoires. Notre étude a porté sur la co-conception de scénarios intégrant ces interactions sur la Plaine Ouest de Montpellier. Dans le cadre d'une démarche participative mobilisant l'outil Co-Click'Eau, trois scénarios ont permis d'explorer des stratégies de réduction des pesticides différentes : diversification agricole pour l'alimentation locale, préservation de la biodiversité et maximisation des interactions culture-élevage. La démarche a permis de mobiliser une grande diversité d'acteurs autour de l'enjeu de la réduction des pesticides. Les résultats montrent en quoi l'élevage peut contribuer à limiter l'usage des pesticides tout en répondant à d'autres enjeux portés par les acteurs du territoire. Cette approche a permis de mettre en évidence des convergences possibles entre stratégies et souligne la nécessité d'une coordination accrue des acteurs.

Mots-clés : Scénarios, conception participative, réduction des pesticides, pastoralisme, territoire, contexte méditerranéen, biodiversité, autonomie alimentaire, action collective

Co-design of crop-livestock integration scenarios for pesticide reduction at territory level.

Interactions between crops and livestock are one way to reduce pesticide use at the territorial level. This study focused on the co-design of scenarios integrating these interactions in the Western Plain of Montpellier. Through a participatory approach using the Co-Click'Eau tool, three scenarios were developed to explore different pesticide reduction strategies: agricultural diversification for local food supply, biodiversity conservation and maximising crop-livestock interactions. The approach mobilised a wide range of stakeholders around the issue of pesticide reduction. The results show how livestock can contribute to reducing pesticide use while addressing other issues raised by local stakeholders. This approach has highlighted possible convergences between strategies and the need for greater coordination between stakeholders.

Keywords: Scenarios, participatory design, pesticide reduction, pastoralism, territory, Mediterranean context, biodiversity, food self-sufficiency, collective action

1. Introduction

L'utilisation de pesticides génère des impacts d'ordre environnemental (Stehle and Schulz 2015 ; Sánchez-Bayo and Wyckhuys 2019), sanitaire (Mehrpour *et al.* 2014 ; Rani *et al.* 2021 ; Athukorala *et al.* 2023), ou encore socio-économique (Waterfield and Zilberman 2012 ; Alliot *et al.* 2022). Traiter ces problématiques complexes implique de construire des solutions systémiques prenant en compte les différents domaines d'impact et d'interdépendances entre acteurs contribuant directement ou indirectement à l'utilisation des pesticides (Jacquet *et al.* 2022 ; Brunelle *et al.* 2024). Parmi les pistes



techniques et organisationnelles pour la réduction des pesticides, l'intégration culture-élevage semble prometteuse pour développer les surfaces en cultures fourragères ou en prairies, moins consommatrices (Mischler *et al.* 2020 ; Grinnell *et al.* 2022). Elle peut également contribuer au maintien de la qualité des sols (Sainju *et al.* 2020 ; Verret *et al.* 2022), à la durabilité des filières et des territoires (Moraine *et al.* 2020 ; Sekaran *et al.* 2021 ; Ma *et al.* 2022) ou encore à l'autonomie à l'échelle de la ferme (Bonaudo *et al.* 2014 ; Le Gal *et al.* 2022).

Nous avons mené une démarche participative avec les acteurs du territoire de la Plaine Ouest de Montpellier (Hérault, France) pour identifier des leviers de transition vers une réduction forte des pesticides à l'échelle du territoire, en mobilisant le levier des interactions culture-élevage. Afin de permettre aux acteurs de se projeter dans un avenir de moyen terme, mais avec créativité, nous avons choisi de co-concevoir avec eux des scénarios d'évolution d'assolement à l'échelle du territoire, que nous avons cherché à incarner sur le territoire. Puis nous avons proposé une évaluation des scénarios via l'outil Co-Click'Eau (Chantre *et al.* 2016), en intégrant dans les indicateurs les enjeux locaux et le déploiement de l'élevage. Nous présentons dans cet article la démarche qui a été mise en place pour concevoir et discuter les scénarios avec les acteurs du territoire, les sorties des scénarios et les discussions qui ont suivi. Nous terminerons en discutant de la place de l'élevage dans chacun des scénarios et de la pertinence de la démarche.

2. Matériel et méthode

2.1. Présentation générale de la démarche

2.1.1. Territoire d'études

La Plaine Ouest de Montpellier se situe en Hérault entre les agglomérations de Montpellier et de Sète. Elle est délimitée par les collines de la Moure au nord-ouest et le Massif de la Gardiole au sud-est, la ville de Montpellier au nord-est et l'étang de Thau au sud-ouest. La moitié de sa surface (soit 5000 ha) est agricole avec un tiers de cultures annuelles, un tiers de vignes et un tiers de prairies (dont une partie sont en réalité des friches). La viticulture, auparavant majoritaire sur la plaine, a régressé sur le territoire (urbanisation, primes d'arrachage dans les années 2000), au profit d'une agriculture prenant des formes très diverses en productions, surfaces concernées, débouchés et le lien plus ou moins direct aux villes (Hasnaoui Amri *et al.* 2024). Ce territoire périurbain et méditerranéen porte des enjeux de durabilité multiples : exposition forte au changement climatique, risque incendie, nécessité de protéger les ressources en eau, préservation de la biodiversité et de la fertilité des sols, accès au foncier ou opportunités de valorisation des produits en vente directe ou locale.

2.1.2. Une démarche de scénarisation exploratoire

Nous avons mené une démarche en cinq étapes (voir Figure 1) visant à construire 3 scénarios exploratoires, qui questionnent ce à quoi le territoire pourrait ressembler si la réduction des pesticides était couplée à un autre enjeu fort du territoire. Chaque étape a été nourrie d'interactions avec les acteurs et des données de terrain et a été l'occasion d'approfondir le rôle de l'élevage dans la réduction des pesticides sur le territoire. La dimension exploratoire des scénarios (Börjeson *et al.* 2006) implique qu'ils soient construits dans une logique « optimiste », i.e. avec le postulat que les facteurs de réalisation sont réunis, et « systémique », i.e. intégrant les différents domaines de mise en œuvre et d'impact des changements sur le territoire. Ces trois scénarios ont ensuite été mis en discussion avec des acteurs d'autres territoires pour identifier des pistes d'action cohérentes avec la diversité des enjeux et leviers d'action du territoire. Cette démarche a mobilisé l'outil Co-Click'Eau (Chantre *et al.* 2016).

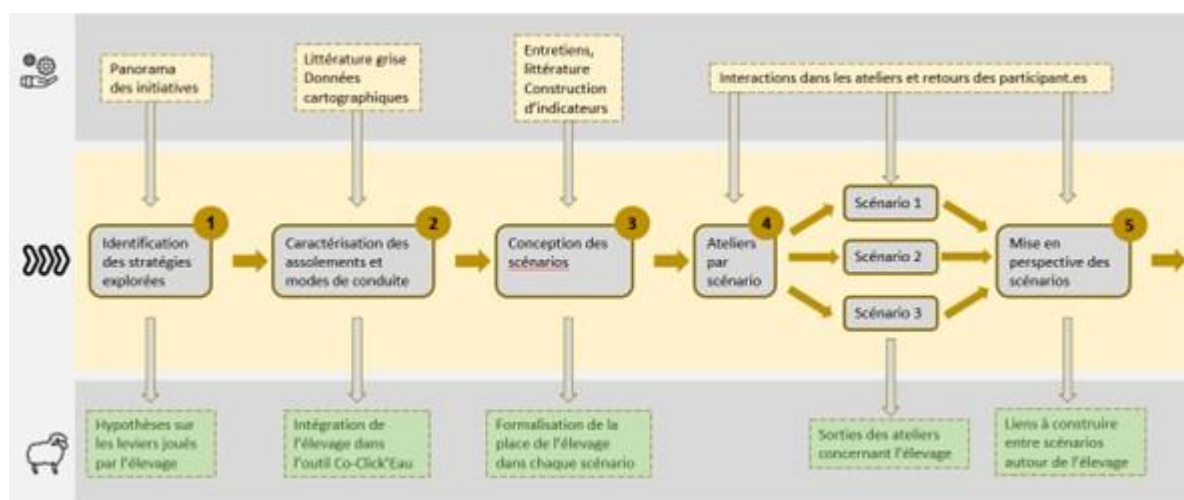


Figure 1 : Présentation de la démarche Co-Click'Eau appliquée à cette étude. La ligne sur fond jaune indique les différentes étapes du processus, la ligne supérieure les éléments opérationnels ayant nourri ces étapes et la ligne inférieure les réflexions et sorties concernant l'élevage issues de chaque étape.

2.2. Détail sur les 5 étapes de la démarche

2.2.1. Des scénarios inspirés de stratégies portées par les acteurs du terrain

Nous avons d'abord identifié les stratégies de réduction des pesticides déployées par les acteurs du territoire. 19 initiatives ont été recensées, chacune étant rattachée à d'autres enjeux (qualité de l'eau, alimentation locale, biodiversité) et diversement connue et soutenue des acteurs du territoire. Parmi ces initiatives, trois stratégies de réduction des pesticides se dégagent (Parmantier *et al.*, 2024), dans lesquelles nous formulons des hypothèses sur les leviers liés à l'élevage : (i) Diversifier les productions agricoles en faveur d'une alimentation humaine locale et de qualité avec un élevage qui valorise les cultures de diversification, comme les légumineuses fourragères (Martin *et al.* 2016) (Plaine Nourricière) ; (ii) Préserver la biodiversité et favoriser les régulations biologiques tout en maintenant une mosaïque paysagère agricole l'élevage rend des services écosystémiques à l'échelle du territoire en maintenant des espaces riches en biodiversité, notamment les prairies (Lemaire *et al.* 2014) mais aussi via le pâturage qui permet la réouverture des milieux (Scheromm *et al.* 2021) (Mosaïque paysagère) ; (iii) Développer l'élevage pastoral en créant des interactions fortes entre espaces naturels et agricoles via des interactions culture-élevage à l'échelle du territoire (ICET) qui s'accompagnent de différentes formes d'organisation (Moraine *et al.* 2019) (Potentiel de l'élevage).

2.2.2. Caractérisation des assolements et des modes de conduite

Dans cette étape, nous avons décrit la situation de référence (territoire actuel) dans l'outil Co-Click'Eau. Cet outil prend en compte les différentes cultures du territoire ainsi que les modes de conduite associés à ces cultures (précisés pour le territoire) (Soulié *et al.* 2019 ; Pelzer *et al.* 2020). En croisant des données issues d'entretiens, du Registre Parcellaire Graphique (RPG), de rapports, travaux de recherche et de données régionales (Buresi *et al.* 2024), nous avons identifié sept cultures associées à cinq modes de conduite. Nous avons défini ces modes de façon à rendre compte de la diversité des systèmes de production du territoire. 4 croisent labellisation en agriculture biologique ou pas, et type de valorisation (via une coopérative ou en indépendant). Le cinquième est une subdivision du mode « Biologique/indépendant » et correspond à un mode qui intègre l'élevage directement sur les parcelles (Tableau 1). Pour chaque couple culture-mode de conduite, nous avons reconstitué des itinéraires techniques types. Le Tableau 2 donne la répartition des surfaces à laquelle nous avons abouti.

Tableau 1 : 5 modes de conduite.



		Conduite	
		Conventionnel	Biologique
Débouchés	Coopérative	Raisonné	AB marge -
	Indépendant	Econome	AB marge + Mode élevage +

Tableau 2 : Répartition (en ha) des cultures et modes de conduite sur le territoire.

Cultures	Raisonné	Econome	AB marge +	AB marge -	Elevage +
Vigne	800	500	200	300	100
Céréale	300	200	50	100	10
Pois chiche	0	20	20	0	0
Friche	0	0	0	250	0
Prairie	0	600	0	0	500
Luzerne	0	0	0	100	200
Maraîchage	0	50	20	0	0

2.2.3. Conception des scénarios

Co-Click'Eau est une démarche basée sur un outil d'optimisation sous contrainte qui fonctionne sur la base de la caractérisation de l'assolement actuel (cf 2.2.) et d'indicateurs à définir pour optimiser, contraindre le scénario et l'évaluer (Soulié *et al.* 2019). Nous avons défini 22 indicateurs, classés en cinq sous-groupes (Tableau 3) pour rendre compte des performances de chacun des trois scénarios.

Tableau 3 : Indicateurs retenus pour optimiser, contraindre et évaluer les scénarios

Pratiques agricoles	Alimentation	Elevage	Biodiversité	Débouchés
Production	Nombre d'humains nourris à l'hectare au total	Nombre d'hectares pâturés	Indicateur biodiversité total (dont reptiles, insectes, oiseaux et faune du sol) (Gaucher 2024)	Débouchés en local ou en circuit long
Rendement	Nombre d'humains nourris à l'hectare par des productions végétales	Potentiel petit ruminant	Part d'infrastructures agroécologiques (IAE)	Valorisation économique des produits
Indice de fréquence de traitement - IFT (total, herbicides, hors herbicides, biocontrôle)	Nombre d'humains nourris à l'hectare par des productions animales	UGB été potentiel (nombre d'animaux potentiellement nourris en été, période de ressources limitées)	Part de la surface labourée	
Irrigation	Compétition feed/food			

Plaine Nourricière : indicateur « IFT total » optimisé. Nous avons ensuite contraint le scénario sur les indicateurs nourriciers (doublement du nombre d'humains nourris à l'hectare) et sur l'évolution des assolements (limitation des surfaces en maraîchage ou de certains modes de conduite).

Mosaïque Paysagère : indicateur « Biodiversité » optimisé puis contraintes sur les évolutions d'assolement par culture pour maintenir une mosaïque paysagère diversifiée. Nous avons également

contraint d'autres indicateurs comme la part d'Infrastructures Agroécologiques (IAE) pour qu'elles représentent au moins 20 % de la SAU du territoire. Nous avons également contraint le scénario pour qu'il propose une production agricole et alimentaire similaire aux niveaux d'aujourd'hui.

Potentiel de l'Élevage : indicateur « déviation » optimisé (minimisation de l'évolution de l'assolement actuel). Ce scénario a pour objectif d'identifier, dans le territoire actuel, des espaces pour l'élevage pastoral, avec au moins 1/3 des surfaces du territoire devant être pâturées et les espaces disponibles pour le pâturage en été devant augmenter, tout comme le pâturage des vignes et des céréales.

2.2.4. Ateliers par scénario

Nous avons organisé un atelier de présentation de chacun des scénarios auprès d'acteurs porteurs de ces stratégies entre juin et septembre 2024. Cela présentait l'intérêt de créer un espace de discussions favorisant le développement d'une gouvernance cohérente en présentant les scénarios auprès d'acteurs déjà convaincus et avec les connaissances techniques nécessaires à l'amélioration des scénarios (Gisclard *et al.* 2015). Voici les informations principales par atelier :

- **Plaine nourricière** : 4 participant.es (Civam bio, communes du territoire, Ministère de l'agriculture et Institut Agro Montpellier). Thème : évolutions d'assolements souhaitées et pratiques agricoles associées.
- **Mosaïque paysagère** : 3 participantes (FR Civam, LPO, CEN). Thème : spatialisation du scénario.
- **Potentiel de l'élevage** : 5 participant.es (CEN, SAM, Cirad). Thème : interactions entre espaces via le pastoralisme et des enjeux organisationnels de la réintroduction de l'élevage sur le territoire.

2.2.5. Mise en perspective des scénarios

13 personnes ont participé à notre atelier de mise en perspective des scénarios en décembre 2024 qui avait 2 objectifs : confronter les résultats des scénarios à ce qui se faisait ailleurs, et confronter les scénarios entre eux pour identifier des convergences (pistes d'action) et tensions (pistes de dialogue à construire) entre scénarios. Pour cela, nous avons d'abord fait réagir les personnes présentes sur chacun des scénarios. Pour créer du lien entre les différents retours d'expérience, nous avons proposé un support permettant d'identifier les pratiques, modifications d'assolement, organisationnelles et éventuelles tensions liées à l'introduction d'une innovation sur un territoire (Figure 2). Puis une restitution commune a été faite pour identifier les points de convergences ou de tensions entre les scénarios.

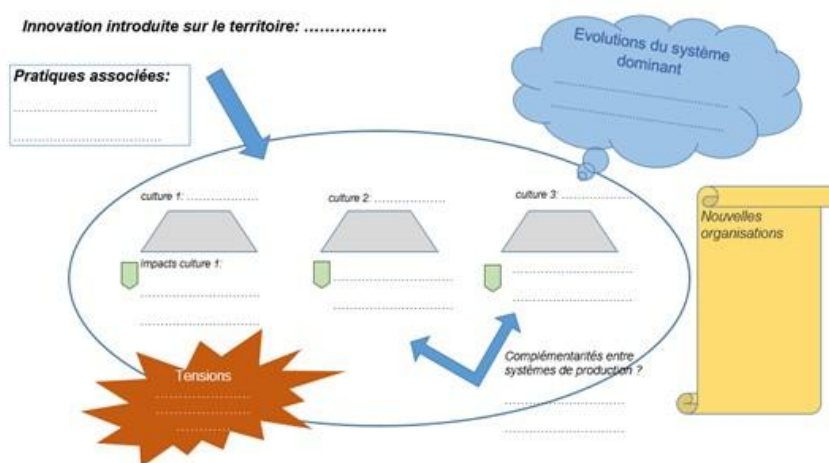


Figure 2 : Support de discussion sur les retours d'expérience d'autres territoires



3. Résultats

3.1. Présentation des trois scénarios

Le tableau 4 à la fin de cette partie récapitule les évolutions des indicateurs en comparaison à la situation de référence par scénario tel que stabilisé à l'issue de l'étape 4.

3.1.1. Scénario plaine nourricière (PN)

- **Évolutions proposées par le scénario**

Conception. Le scénario « Plaine nourricière » vise à conserver un niveau similaire ou réduit de compétition entre alimentation humaine et animale, doubler l'alimentation humaine et réduire fortement l'utilisation de pesticides. Il propose des évolutions radicales de l'assolement du territoire et une transition vers des modes en agriculture biologique, notamment couplés à de l'élevage.

Évolutions par rapport à la situation initiale. La luzerne passe intégralement en mode « élevage + » (valorisée par l'élevage, dont pâturage) et mobilise moins de surfaces, passant de 300 à 248 ha. La vigne connaît également une réduction importante de ses surfaces (de 1900 ha à 1648 ha) avec une réduction importante du mode « AB marge - » et une disparition totale du mode « raisonné ». Le mode « élevage + », parce qu'il permet une production alimentaire sur les espaces en vigne, augmente très fortement en passant de 100 ha à 570 ha. Le pois chiche est la culture qui connaît la plus forte évolution en passant de 40 ha à 452 ha. La friche disparaît du territoire et la prairie diminue aussi fortement, passant de 1100 à 342 ha. Le maraîchage passe de 70 à 129 ha et les céréales de 660 à 1500 ha, avec une augmentation très importante des modes « AB marge + » et « élevage + ». Ce scénario propose une évolution vers les deux modes les plus en rupture : AB marge + et Elevage +. Il permet de diviser par deux l'IFT total de la plaine tout en multipliant par deux son potentiel nourricier à l'hectare. Ce scénario modifie profondément les filières avec une augmentation des modes en débouché local (+ 127 %).

- **Enrichissement du scénario dans l'atelier de l'étape 4**

Ce scénario ne se positionne pas comme un outil de réflexion sur la transformation des filières en tant que telles, mais plutôt comme une base de réflexion sur les changements agronomiques et évolutions d'assolements pouvant être mis en place pour lever des verrous. Les discussions en atelier ont permis de donner plus de corps à certaines évolutions, intégrer de la complexité dans un scénario qui simplifie la réalité : concernant le maraîchage, une participante a mentionné l'importance de la « diversification des espèces cultivées (...). En maraîchage selon le modèle on a une grande variabilité du nombre d'espèces cultivées et c'est assez intéressant à discuter avec les maraîchers ». Enfin, les participants ont souligné que ces évolutions seraient conditionnées à une coordination forte entre différents acteurs du territoire et des filières en présence, mais aussi à une réflexion plus approfondie sur les évolutions possibles des pratiques (vers une agroécologie « forte » ou « faible »).

- **Place de l'élevage dans le scénario**

L'élevage est arrivé spontanément comme un levier de réduction des pesticides pour le territoire, tout en étant discuté au prisme de l'enjeu nourricier et alimentaire du scénario. Sur les légumineuses fourragères, les personnes ont cité la nécessité de trouver un compromis entre ses bénéfices agronomiques et les objectifs de réduction des produits d'origine animale dans l'alimentation : « il y aura plus de légumineuses fourragères, mais il faut diminuer la consommation de viande aussi », mais aussi « mais en même temps là on est sur du local, on voudrait produire de la viande en local, paradoxalement ». La diversité actuelle de l'élevage a aussi été discutée (une partie de l'élevage actuel étant les équidés), soulevant la question des prairies du territoire, qui peuvent être issues d'anciennes friches (« j'ai pris une part de friche que je réinjecte en prairie, en me disant qu'on peut mettre des troupeaux à pâturer sur certaines friches »), mais qui se réfléchissent aussi en lien avec les remontées salines de plus en plus fréquentes sur la plaine. Ces remontées salines pourraient finalement



représenter une opportunité pour les élevages du territoire : « Qualitativement et surtout gustativement en fait, avec les remontées salines qu'on commence à avoir sur le littoral, on a une meilleure qualité de la viande, qui se rapprocherait (...) du label rouge prés salés de Bretagne » Dans ce scénario, l'élevage est maximisé sur les espaces agricoles comportant déjà une autre production (céréales, vigne), ce qui permet de réduire la compétition entre surfaces destinées à l'alimentation humaine et animale (indicateur feed-food) de 64 %. Ainsi, une vigne pâturée peut combler les besoins en viande de 0,56 personnes par an, tandis que sans élevage, son potentiel alimentaire est considéré comme nul. D'autre part, l'intégration de l'élevage permet de valoriser la luzerne présente sur le territoire et ainsi de diversifier les rotations de façon plus durable économiquement. Après la présentation du scénario, les acteurs ont finalement questionné le lien entre l'élevage produit sur le territoire et l'élevage importé : « est-ce que ça se substitue à des importations d'animaux, ou est-ce qu'on considère que l'alimentation va rester à l'identique, ou qu'on va quand même baisser ces protéines animales ? », « Agronomiquement c'est parfait, ça me va très bien l'élevage parce que ça dessine le paysage et puis ça permet d'avoir une agriculture résiliente, je me pose plus de questions sur l'alimentation, ou l'alimentaire, il faudrait pas que ça joue au détriment de la baisse ... que ça crée une augmentation des protéines animales ».

3.1.2. Scénario Mosaïque paysagère (MP)

- **Evolutions des assolements et indicateurs du scénario**

Conception. Le scénario « Mosaïque paysagère » vise à maintenir et développer la biodiversité du territoire en lien avec les pratiques agricoles, mais aussi sur la réflexion autour du maintien d'une mosaïque paysagère favorable aux espèces à protéger. Nous avons maximisé l'indicateur Biodiversité et contraint l'évolution des assolements pour pouvoir maintenir une diversité de productions agricoles et alimentaires. L'indicateur « compétition feed-food » n'a pas été contraint.

Evolutions par rapport à la situation initiale. Ce scénario montre des évolutions de surfaces par culture importantes par rapport à l'actuel : baisse des surfaces en vigne au profit de la friche, des céréales et de la prairie. Cette évolution s'accompagne d'autres changements importants pour le territoire. Le passage aux différents modes en AB, et principalement en AB marge + et élevage + orientent l'agriculture vers un marché local et donc plus de circuit court et potentiellement une valorisation (ou marge économique) plus importante. La compétition feed-food est en augmentation (+51 %) avec l'augmentation des surfaces en prairie, qui sont exclusivement destinées à l'alimentation animale. Enfin, le nombre d'humains nourris au total sur le territoire reste stable (-5 %), avec une petite baisse de l'alimentation à base de produits végétaux, compensée par une augmentation forte de l'élevage local. En effet, ce scénario double le nombre d'hectares pâturés. Enfin, l'impact sur la biodiversité est important avec une forte augmentation des indicateurs biodiversité (55 %) et des sous-ensembles composant cet indicateur : oiseaux (+54 %), reptiles (42 %), insectes (76 %) et faune du sol (50 %). Enfin, les IFT connaissent une baisse très forte (près de 100 %), qu'il convient de nuancer en raison de manque de données plus précises sur le biocontrôle et certaines traitements (antiparasitaires pour les animaux, semences...)

- **Enrichissement du scénario dans l'atelier de l'étape 4**

Nous avons complété la présentation et les discussions par une session de spatialisation de l'assolement proposé par Co-Click'Eau. Nous avons tout d'abord identifié des « îlots de mosaïque paysagère », soit des patches de cultures à agencer ensemble en fonction des enjeux du territoire (Figure 3).

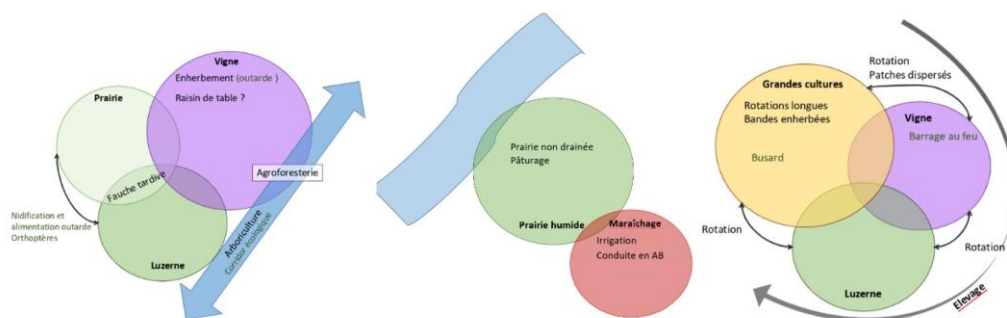


Figure 3 : Schémas des îlots de mosaïque paysagère. Issus des ateliers et remis au propre par la suite. Le premier îlot est basé sur une dominante vigne, le deuxième sur la prairie en zone humide et le troisième sur une dominante vigne.

Le premier îlot envisagé se construit autour de la vigne, en utilisant les zones viticoles du territoire. Dans un objectif de protection de la biodiversité, notamment pour l'outarde canepetière, la vigne est enherbée et entourée de luzerne et de prairie pour favoriser les habitats de l'espèce. Une bande tampon arboricole a également été proposée pour créer des corridors écologiques. Le deuxième îlot se concentre sur les zones humides, avec des prairies non drainées, pâturées de façon extensive et associées à des espaces de maraîchage irrigués. Enfin, nous avons proposé d'intégrer des surfaces en grandes cultures dans les zones viticoles pour diversifier le paysage. Cela permet de créer des îlots céréaliers en interaction avec des espaces viticoles et en légumineuse fourragère, favorisant une mosaïque paysagère avec des infrastructures agroécologiques et des rotations longues. Les différents îlots ont ensuite été spatialisés sur une carte du territoire en tenant compte des contraintes spécifiques du territoire (zones humides, projets de protection de l'outarde, proximité entre le Causse d'Aumelas et la colline de la Moure...). Ce travail nous a permis de voir que si ce scénario était très ambitieux, il était possible de le matérialiser sur la carte du territoire en envisageant des complémentarités entre productions et entre enjeux.

• Place de l'élevage dans le scénario

L'élevage apparaît à plusieurs reprises comme un levier à mobiliser. Tout d'abord, dans la construction même de l'indicateur biodiversité, il améliore globalement l'impact biodiversité des modes de conduite identifiés, via la fertilisation organique, la présence de couverts d'intérêt faunistique, la réduction des herbicides et du travail du sol, ou encore le pâturage (selon la date de pâturage). Lors des discussions en atelier, l'élevage a été mentionné dans les trois îlots de mosaïque paysagère pour faire du lien entre les espaces, maintenir l'état des prairies et globalement valoriser les différents espaces. Les zones humides peuvent être pâturées selon la saison et de façon extensive, ainsi que les espaces en vigne, grandes cultures ou luzerne. Les zones à dominante vigne, couplées à des espaces en prairie et en luzerne pour favoriser l'outarde canepetière, peuvent aussi être valorisées par l'élevage.

3.1.3. Scénario Potentiel de l'élevage (PE)

• Evolutions du scénario

Conception. Ce scénario vise à identifier les espaces mobilisables par l'élevage dans le territoire actuel. Il considère le territoire en interaction avec d'autres espaces, notamment le littoral et les garrigues environnantes. Nous avons choisi de limiter les évolutions d'assolement de cultures pour le territoire afin d'identifier les espaces où l'élevage pouvait s'intégrer. Dans ce scénario, l'indicateur « compétition feed-food » a été contraint à ne pas augmenter tandis que le nombre d'animaux a été augmenté.

Evolutions par rapport à la situation initiale : Dans ce scénario, les surfaces en friche diminuent, ainsi que les surfaces en prairie dans une moindre mesure. Le scénario s'accompagne d'une



augmentation des surfaces en luzerne, qui présentent un fort potentiel pour nourrir les élevages, malgré un potentiel en pastoralisme limité (météorisation). Le scénario crée également une augmentation des surfaces en vigne mais avec une forte croissance du mode de conduite « élevage + », avec une valorisation des inter-rangs.

• Enrichissement du scénario dans l'atelier de l'étape 4

Lors de l'atelier, la question de la coordination a été soulevée par les acteurs qui cherchent à équilibrer leurs objectifs avec ceux des éleveurs : « pour cette année, [mon objectif] ce serait de pouvoir travailler convenablement avec le berger avec qui nous sommes en partenariat, le respect des périodes sur le plan écologique, d'améliorer la communication ». Ensuite, les freins et leviers techniques ont été discutés, notamment en ce qui concerne les interactions entre viticulture et élevage, particulièrement sur la qualité des sols (tassement, fertilisation). Enfin, la question de la temporalité a été largement évoquée, concernant le financement, l'installation et la gestion de la ressource alimentaire pour les troupeaux. En hiver, les garrigues et les vignes constituent les principales ressources alimentaires. Ces dernières sont complémentaires, comme l'a souligné un participant : « historiquement c'est ça qui était fait aussi, les vignes étaient pâturées en complémentarité avec les garrigues, voire même les brebis passaient la journée en garrigue et descendaient dormir dans les vignes la nuit pour venir fumer les parcelles ». En été, les zones humides, comme les bords du Coulazou et de la Mosson, les salines de Villeneuve et le lido des Aresquiers, offrent des ressources plus fraîches. Ainsi, les discussions ont permis de souligner l'importance de certains espaces (prairies) et les formes de complémentarités possibles entre la plaine et les espaces autour (garrigues, littoral).

• Place de l'élevage dans le scénario

Ce scénario a été présenté à un comité de personnes travaillant sur le développement de l'élevage pastoral, sous différents angles (accompagnement technique, appui financier via des paiements pour services environnementaux, mesures compensatoires). L'atelier a permis de préciser les interactions possibles entre les différents espaces du territoire et leur agencement temporel. Nous avons observé une divergence entre notre vision du potentiel de l'élevage et celle des participants, qui privilégient l'élevage dans les espaces naturels, notamment les garrigues, autour de la plaine, et s'intéressent moins à l'interaction avec les cultures. Ainsi, les interactions directes entre cultures et élevages dans la plaine ne semblent pas être une priorité pour les participants : « là je vois un scénario où la ressource fourragère diminue en prairie et en friche, ce qui interpelle un petit peu. (...) dans la plaine c'est forcer les interactions avec les cultures ». L'élevage est perçu davantage comme un levier paysager pour maintenir l'ouverture des espaces et la biodiversité, ou comme un outil pour mobiliser du foncier agricole, plutôt que comme une solution agronomique pour réduire les pesticides dans les espaces cultivés.

Tableau 4 : Evolution des principaux indicateurs à partir de la situation de référence, par scénario.

	Plaine Nourricière	Mosaïque Paysagère	Potentiel de l'élevage
Indicateur optimisé	IFT (minimisé)	Biodiversité (maximisé)	Déviations (minimisé)
IFT total	-49,5 %	-85,7 %	-53,2 %
Alimentation - végétal	109,6 %	-9,9 %	-32,0 %
Alimentation - élevage	-29,8 %	130,1 %	112,3 %
Alimentation - total	104,7 %	-5,0 %	-26,9 %
Compétition feed/food	-64,3 %	51,5 %	0,6 %
Débouché local	126,9 %	69,7 %	29,0 %



Hectares pâturés	14,4 %	97,8 %	58,3 %
UGB été potentiel	-18,3 %	66,9 %	39,6 %
Biodiversité	14,0 %	55,2 %	25,9 %
Part IAE	-0,5 %	66,5 %	7,8 %
Surface labourée	-22,8 %	-87,6 %	-83,9 %

3.2. Atelier de mise en commun

L'atelier organisé pour l'étape 5 a permis d'identifier des similitudes entre les stratégies de réduction des pesticides suivies dans les scénarios et dans les territoires qui étaient représentés. Dans chacun des groupes, plusieurs projets en lien avec la réduction des pesticides portés dans d'autres territoires ont été identifiés et décrits selon leur impact sur les systèmes de production. L'étape de restitution commune a permis de mettre en lumière des points de tension et de convergence entre les scénarios. La Figure 4 est une retranscription du support utilisé lors de la restitution en plénière de cet atelier, qui a été complété par les personnes qui l'animaient. Cette étape a permis d'identifier des freins et leviers techniques, organisationnels, sociaux ou économiques à la mise en place d'une stratégie coordonnée entre ces scénarios. A titre d'exemple, la mise en place d'un abattoir mobile peut créer des convergences en répondant aux enjeux organisationnels des scénarios Potentiel de l'élevage et Plaine Nourricière, et la mise en place de filières légumineuses peut faire converger les scénarios Plaine Nourricière et Mosaïque Paysagère. Nous avons ainsi identifié la nécessité d'un conseil et d'un accompagnement importants, mais aussi l'intérêt d'une coordination entre les agriculteurs indépendants – hors coopérative (dont la proportion augmente dans les trois scénarios) et entre acteurs du territoire pour penser les assolements à cette échelle, des éléments techniques permettant une meilleure gestion du foncier agricole, ou encore la question de la sensibilisation du voisinage. Enfin, des tensions ont été repérées, par exemple sur la question des ressources (eau, prairie), du lien aux villes dans un contexte périurbain (artificialisation des sols) ou encore des tensions techniques comme la gestion de la problématique de la prédation et la gestion de la saisonnalité des productions en lien avec cette des filières.

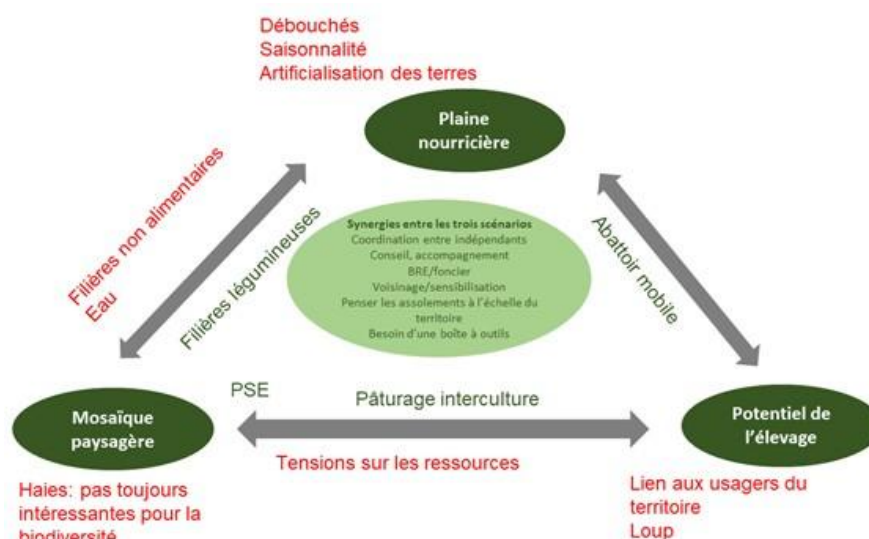


Figure 4 : Retranscription du support de restitution de la mise en confrontation des trois scénarios. Les trois bulles représentent les trois scénarios, les éléments en rouge en dehors du triangle sont les points de tension relevés par scénario ou entre scénarios, tandis que les éléments dans la bulle verte centrale sont les convergences identifiées.



4. Discussion : comment l'élevage peut-il être un levier de réduction des pesticides à l'échelle du territoire ?

4.1. Différents rôles joués par l'élevage

Notre démarche a permis de proposer trois stratégies de réduction systémique des pesticides à l'échelle de la Plaine Ouest de Montpellier. Nous avons intégré une diversité d'acteurs, issus du territoire et d'en dehors, à ce processus. Chacun de ces scénarios permet d'explorer en profondeur une certaine dimension du territoire, et avec celle-ci, un rôle différent que l'élevage peut jouer pour réduire les pesticides sur le territoire.

Le scénario Plaine Nourricière perçoit le territoire comme une agrégation de parcelles agricoles avec un potentiel plus ou moins important de réduction des pesticides. L'élevage y est une façon de valoriser certains espaces pour l'alimentation humaine qui ne le seraient pas autrement (inter-rang, intercultures, prairies, luzerne inter-vignes et friches). Il permet ainsi de diversifier les productions du territoire valorisables localement, mais aussi de diversifier les productions à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation pour contribuer à réduire les pesticides. Dans le scénario Mosaïque paysagère, le territoire est envisagé comme des parcelles agricoles qui interagissent entre elles et avec les espaces naturels. L'élevage permet de faire le lien entre ces espaces et de maintenir les différents milieux et réduire l'utilisation de pesticides dans certains cas (vigne et céréales notamment). Dans la construction de l'indicateur « biodiversité », nous avons identifié un point d'attention : la date de pâturage de certains espaces naturels comme agricoles, quand elle est trop avancée, peut avoir un impact négatif pour la biodiversité. Enfin, le scénario « potentiel de l'élevage » a permis d'explorer plus en détail les liens possibles entre différents systèmes de production agricole et des espaces naturels par l'élevage, notamment en prenant en compte la temporalité de la disponibilité des ressources alimentaires. Dans ce scénario, qui dévie peu du territoire actuel, l'élevage valorise au maximum tous les espaces disponibles pour alimenter les troupeaux, notamment dans les zones cultivées.

Dans l'ensemble de la démarche, même lorsque l'élevage n'était pas le sujet principal, il est revenu dans les discussions, surtout pour le potentiel que représente l'élevage pastoral pour le territoire. L'atelier de prise de recul sur les trois scénarios a montré des convergences entre les scénarios autour de l'élevage, soulignant la pertinence de ce levier pour une grande diversité d'acteurs alors que l'élevage pastoral apparaissait au départ comme un levier circonscrit aux zones et aux acteurs qui œuvrent à son développement. Cela souligne le rôle prometteur de certaines formes d'élevage dans une transition de territoire articulant réduction de pesticides et autres enjeux.

4.2. Sortir du consensus, mais aller vers l'action

Notre démarche a permis de mettre en évidence que la biodiversité, l'alimentation et l'élevage constituaient de potentiels objets intégrateurs (Lardon *et al.* 2017) pour mener des réflexions à l'échelle de la Plaine Ouest de Montpellier, mais aussi en dehors via l'atelier avec des personnes issues d'autres territoires. En effet, les trois scénarios, tels que construits avec l'outil Co-Click'Eau et tels que discutés lors des ateliers, ont permis de montrer le potentiel de ces stratégies pour aller vers une réduction drastique des pesticides à l'échelle du territoire en intégrant une diversité d'acteurs dans la démarche.

Ces stratégies sont issues des actions et projets déjà portés par les acteurs de la Plaine Ouest de Montpellier : notre premier diagnostic montre qu'il y existe une diversité de stratégies intéressantes pour la réduction des pesticides portées sur le territoire, mais qu'elles mobilisent des acteurs et des objectifs différents (Parmantier *et al.*, 2024). Nous avons transposé ces stratégies en scénarios d'assolement qui sont devenus des bases de discussion sur ce qui était possible vis-à-vis des enjeux du territoire. Nous les avons ensuite mis en discussion entre eux, non pas pour parvenir à un scénario consensuel mais plutôt pour favoriser les discussions sur les convergences à explorer et les tensions sur lesquelles créer



du dialogue. Cela fait écho à des recherches dans d'autres disciplines qui montrent que la confrontation peut permettre d'augmenter la créativité d'un groupe (Badke-Schaub *et al.* 2010).

5. Conclusion

Cette démarche, qui est encore en cours au moment où nous écrivons cet article, a permis de mobiliser une grande diversité d'acteurs sur une période de plusieurs mois pour réfléchir aux évolutions possibles du territoire vers le « zéro phytos ». Elle a permis de mobiliser des acteurs très divers sur plusieurs mois pour améliorer ces scénarios, puis les mettre en perspective entre eux et avec d'autres territoires. Les scénarios construits avec l'outil Co-Click'Eau ont constitué une base aux discussions et réflexions sur les possibilités d'action pour la transition agroécologique du territoire. Notre démarche a mis en valeur le potentiel d'une réflexion autour de la réduction des pesticides couplée à d'autres enjeux de territoire, avec un intérêt à la fois pour la mobilisation des acteurs et l'identification de convergences entre les actions menées et les stratégies portées par les acteurs. Enfin, la démarche a permis de clarifier le potentiel de l'élevage pour répondre à différents enjeux du territoire.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Myrto PARMANTIER : <https://orcid.org/0009-0004-0911-2989>

Marc MORAINÉ : <https://orcid.org/0000-0001-5443-4283>

Rémy BALLOT : <https://orcid.org/0000-0001-8679-6238>

Lorène PROST : <https://orcid.org/0000-0001-9635-2729>

Contributions des auteurs

Conceptualisation : MP, MM, LP ; Investigation et Analyse formelle : MP ; Méthodologie, MP, RB ; Ressources : RB ; Rédaction – ébauche : MP ; Rédaction – relectures : MM, LP, RB.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Nous remercions également l'ensemble des stagiaires ayant travaillé sur ce projet et en particulier Zoé Gaucher.



Déclaration de soutien financier

Les auteurs remercient le PPR Protéger et cultiver autrement et le projet BeCreative pour le financement de ces travaux.

Références bibliographiques

- Alliot C, Mc Adams-Marin D, Borniotto D, Baret PV (2022) The social costs of pesticide use in France. *Front Sustain Food Syst* 6:1027583. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1027583>
- Athukorala W, Lee BL, Wilson C, et al (2023) Measuring the impact of pesticide exposure on farmers' health and farm productivity. *Economic Analysis and Policy* 77:851–862. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2022.12.007>
- Badke-Schaub P, Goldschmidt G, Meijer M (2010) How Does Cognitive Conflict in Design Teams Support the Development of Creative Ideas? *Creat Innov Manage* 19:119–133. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2010.00553.x>
- Bonaudo T, Bendahan AB, Sabatier R, et al (2014) Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57:43–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>
- Börjeson L, Höjer M, Dreborg K-H, et al (2006) Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38:723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Brunelle T, Chakir R, Carpentier A, et al (2024) Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change. *Commun Earth Environ* 5:369. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01533-1>
- Buresi S, Loyce C, Ballot R (2024) Référentiel de performances économiques, environnementales et sociales de pratiques culturales économes en intrants
- Chantre E, Guichard L, Ballot R, et al (2016) Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy* 59:260–271. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.001>
- Gaucher Z. Construction participative d'un scénario de pratiques agricoles favorables à la biodiversité sur la Plaine Ouest de Montpellier. *Sciences et techniques de l'agriculture*. 2024. <dumas-04921559>
- Gisclard M, Chantre É, Cerf M, Guichard L (2015) Co-click'eau : une démarche d'intermédiation pour la construction d'une action collective locale ? *Nat Sci Soc* 23:3–13. <https://doi.org/10.1051/nss/2015003>
- Grinnell NA, van der Linden A, Azhar B, et al (2022) Cattle-oil palm integration – a viable strategy to increase Malaysian beef self-sufficiency and palm oil sustainability. *Livestock Science* 259:104902. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104902>
- Hasnaoui Amri N, Etienne L, Soulard C-T, Michel I (2024) Agriculteurs, citoyens et élus locaux : comment transformer une plaine viticole méditerranéenne en un territoire périurbain nourricier ? *Cah Agric* 33:8. <https://doi.org/10.1051/cagri/2024006>
- Jacquet F, Jeuffroy M-H, Jouan J, et al (2022) Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. *Agron Sustain Dev* 42:8. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00742-8>
- Lardon S, Marraccini E, Filippini R, et al (2017) Prospective participative pour la zone urbaine de Pise (Italie) : l'eau et l'alimentation comme enjeux de développement territorial. *cgq* 60:265–286. <https://doi.org/10.7202/1040535ar>
- Le Gal P-Y, Andrieu N, Bruelle G, et al (2022) Modelling mixed crop-livestock farms for supporting farmers' strategic reflections: The CLIFS approach. *Computers and Electronics in Agriculture* 192:106570. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106570>
- Lemaire G, Franzluebbers A, Carvalho PC de F, Dedieu B (2014) Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190:4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Ma Y, Hou Y, Dong P, et al (2022) Cooperation between specialized livestock and crop farms can reduce environmental footprints and increase net profits in livestock production. *Journal of Environmental Management* 302:113960. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113960>
- Martin G, Moraine M, Ryschawy J, et al (2016) Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron Sustain Dev* 36:53. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>



- Mehrpour O, Karrari P, Zamani N, *et al* (2014) Occupational exposure to pesticides and consequences on male semen and fertility: A review. *Toxicology Letters* 230:146–156. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.01.029>
- Mischler P, Martel G, Tresh P, Chartier N (2020) L'association cultures et élevage : un moyen pour réduire l'usage des pesticides et une piste pour la reconception agroécologique de systèmes de productions agricoles. *Innovations agronomiques* 80:41. <https://doi.org/10.15454/e9fz-fc55>
- Moraine M, Fuselier M, Moerman M (2020) Pathways of sustainability in organic mixed livestock farms are based on local embeddedness: case studies in France and Belgium
- Moraine M, Ramonteu S, Magrini M-B, Choisis J-P (2019) Typologie de projets de complémentarité culture – élevage à l'échelle du territoire en France : de l'innovation technique à l'innovation territoriale. *Innovations agronomiques* 72, 45-59. <https://doi.org/10.15454/MYICHB>
- Parmantier M, Moraine M, Prost L A landscape-scale approach to reducing pesticides: how can the analysis of local initiatives and dynamics support the design of territorial transformations? IFSA 4. Conference "SYSTEMIC CHANGE FOR SUSTAINABLE FUTURES", Jul 2024, Trapani, Italy. (hal-04886918)
- Pelzer E, Bonifazi M, Soulié M, *et al* (2020) Participatory design of agronomic scenarios for the reintroduction of legumes into a French territory. *Agricultural Systems* 184:102893. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102893>
- Rani L, Thapa K, Kanojia N, *et al* (2021) An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production* 283:124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
- Sainju U, Hatfield P, Ragen D (2020) Sheep grazing to control weeds enhances soil carbon, not nitrogen. *Soil Res* 59:586–594. <https://doi.org/10.1071/SR19353>
- Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG (2019) Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation* 232:8–27. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.01.020>
- Scheromm P, Laurens L, Rixen A, Amri Hasnaoui N (2021) Restaurer le pastoralisme autour des villes: L'exemple de Montpellier Méditerranée Métropole. *etudesrurales* 100–119. <https://doi.org/10.4000/etudesrurales.25214>
- Sekaran U, Lai L, Ussiri DAN, *et al* (2021) Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – A review. *Journal of Agriculture and Food Research* 5:100190. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190>
- Soulié M, Bonifazi M, Guichard L, *et al* (2019) Conception et évaluation de scénarios agronomiques de réintroduction de légumineuses dans un territoire de Bourgogne. *Innovations agronomiques* 74, 93-103. <https://doi.org/10.15454/7VWKDT>
- Stehle S, Schulz R (2015) Agricultural insecticides threaten surface waters at the global scale. *Proc Natl Acad Sci USA* 112:5750–5755. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500232112>
- Valentin V, Verret V., Emonet E., Sagot L., *et al*. Impacts agronomiques du pâturage de couverts végétaux et de céréales d'hiver par des ovins. *Fourrages*, 2022, 251, pp.27-37. (hal-03876343)
- Waterfield G, Zilberman D (2012) Pest Management in Food Systems: An Economic Perspective. *Annu Rev Environ Resour* 37:223–245. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-040911-105628>

Pour citer cet article : Myrto Parmantier, Marc Moraine, Rémy Ballot, Lorène Prost. Co-conception de scénarios de complémentarités culture-élevage pour la réduction des pesticides à l'échelle d'un territoire. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.68-81. [10.17180/ciag-2025-vol106-art06](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art06)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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



Acteurs, représentations et stratégies dans les transitions par la bioéconomie circulaire du système agri-alimentaire de l'île de La Réunion

Tiago TEIXEIRA DA SILVA SIQUEIRA^{1,2}, Clément JACQUET^{1,2,3}, Kassi Ange Emmanuel KOUADIO^{1,2*}, Jean-Philippe CHOISIS¹

¹ Université de Montpellier, CIRAD, INRAE Institut Agro Montpellier, SELMET 34000, Montpellier, France

² CIRAD, UMR SELMET, 7 chemin de l'IRAT, 97410 Saint-Pierre, La Réunion

³ Université de Toulouse, INPT, INRAE, UMR AGIR, Toulouse, France

*Travail réalisé dans le cadre du stage de fin d'études

Correspondance : siqueira@cirad.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art07>

Résumé

La bioéconomie circulaire suscite une attention croissante de la part des pouvoirs publics et des acteurs privés comme moyen de conduire des transitions durables dans les systèmes agri-alimentaires. Particulièrement dans les territoires insulaires, où la pression sur les ressources locales est intense et la dépendance aux produits importés est forte. Cette étude analyse la représentation des acteurs sur le rôle de la bioéconomie circulaire et les projets qu'ils portent, pour identifier les principales stratégies de transitions à l'échelle du territoire de La Réunion. Le travail de terrain a été mené en trois étapes : une cartographie des acteurs, 38 entretiens semi-directifs et un atelier participatif réunissant 30 acteurs interviewés. Même si les contours du concept de bioéconomie circulaire restent flous, nos résultats montrent que les acteurs interrogés l'associent à un moyen pour repenser le territoire. Également 20 projets ont été identifiés puis regroupés en trois grandes stratégies de bioéconomie circulaire : (i) substituer les matériaux importés par des alternatives locales ; (ii) favoriser la consommation alimentaire locale ; et (iii) développer le recyclage de la matière organique.

Mots-clés : Économie circulaire ; Système alimentaire ; Biomasse, Transformation ; Insularité ; Innovation

Abstract: Actors, representations and strategies in transitions towards a circular bioeconomy in the agrifood system of Reunion Island

The circular bioeconomy is attracting increasing attention from public authorities and private players as a means of driving sustainable transitions in agrifood systems. This is particularly true in island regions, where pressure on local resources is intense and dependence on imported products is high. This study analyses the way in which stakeholders represent the role of the circular bioeconomy and the projects they are involved in, to identify the main transition strategies for Reunion. The fieldwork was carried out in three stages: a stakeholder mapping exercise, 38 semi-structured interviews and a participatory workshop attended by 30 interviewed stakeholders. Even if the contours of the circular bioeconomy concept remain vague, our results show that the stakeholders interviewed associate it with a means of rethinking the territory. A further 20 projects were identified and then grouped into three mains circular bioeconomy strategies: (i) substituting imported materials with local alternatives; (ii) encouraging local food consumption; and (iii) developing the recycling of organic matter.

Keywords: Circular economy; Food system; Biomass, Transformation; Insularity; Innovation



1. Introduction

Face à la croissance démographique, les impacts du changement climatique et la raréfaction des ressources, des acteurs des systèmes agri-alimentaires⁵ s'engagent sur des voies de transition. L'économie circulaire semble émerger comme un moyen d'engager ces transitions grâce à son potentiel de réduction des impacts environnementaux, de contribution au développement économique (Leipold *et al.*, 2021 ; Giampietro et Funtowicz, 2022) ou encore à la sécurité énergétique et alimentaire d'un territoire (Philp et Winickoff, 2018). Ces vertus semblent retenir l'attention des acteurs politiques au niveau européen et national (e.g. Plan d'action européen pour l'économie circulaire, 2020 ; Pacte vert européen, 2020) mais aussi à l'échelle des territoires, pour s'engager dans les voies de transition par l'économie circulaire.

Malgré ce multiple intérêt pour l'économie circulaire en tant que moyen d'engager les transitions, la majorité des études se focalise sur la mise en œuvre de pratiques d'économie circulaire dans le secteur industriel. Peu s'intéressent à la mise en place d'une économie circulaire des bioressources (bioéconomie circulaire). De plus, la littérature internationale sur les transitions des systèmes agroalimentaires par la bioéconomie circulaire semble peu abondante (Upadhayay *et al.*, 2024). Que ce soit sur la nature des acteurs clés de ces transitions, sur la perception du concept par les acteurs locaux (Flynn *et al.*, 2019) ou encore sur les stratégies mises en place (FAO, 2024). Ces constats sont similaires à ceux faits par Madelrieux et Redlingshofer (2023) dans leur revue de littérature de la communauté de recherche française. D'un côté, ils soulignent l'existence des nombreux travaux mobilisant des approches métaboliques caractérisant les flux de matières et énergies. De l'autre, que peu identifient de manière fine les acteurs potentiels des transitions, en caractérisent leurs pluralités de valeurs, leurs différences de pouvoir et les manières dont ils s'associent ou pas pour conduire ces transitions.

Les études empiriques dans les contextes insulaires tropicaux semblent être encore plus rares. Or, ces contextes sont fortement marqués par une dépendance aux ressources importées et une concurrence d'usage accru sur les ressources locales (Kleinpeter *et al.*, 2023 ; Russeil *et al.*, 2023). La mise en place d'une bioéconomie circulaire semble un important moyen d'engager les acteurs des systèmes agroalimentaires pour une meilleure valorisation de la biomasse locale contribuant à la réduction de l'importation de ressources et des impacts environnementaux (Vigne *et al.* 2021).

Pour nourrir ces réflexions, nous nous intéressons au système agroalimentaire dans le contexte insulaire de l'île de La Réunion. L'île de La Réunion, située au Sud de l'Océan Indien, au large de Madagascar est une île volcanique marquée par une forte dépendance aux importations. En effet, en 2021, La Réunion a importé 6,2 milliards d'euros de biens et en a exporté 376 millions (Insee, 2022). L'agriculture réunionnaise ne manque pas à cette tendance en important des aliments pour animaux et des engrais minéraux de synthèse (respectivement environ 222 000 et 30 000 tonnes de matière brute par an en 2018) (DAAF La Réunion-douanes, 2019 ; Urcoopa, 2019). Néanmoins, elle produit une quantité importante de biomasse qui s'élève à 2 millions de tonnes de matières organiques brutes par an (Vigne *et al.*, 2021). Face aux enjeux de soutenabilité et suite à l'augmentation des prix des intrants chimiques, la valorisation de cette biomasse dans une logique d'économie circulaire semble attirer de plus en plus l'attention des acteurs du territoire (Siqueira *et al.*, 2025).

⁵ Ce concept est notamment défini par l'Organisation des Nations Unis pour l'alimentation et l'agriculture comme « l'ensemble des activités et des acteurs interconnectés qui contribuent à faire passer les aliments du champ à la fourchette. Cette définition large englobe tout, de la production et de la transformation agricoles à la distribution, à la consommation et à la gestion des déchets. Elle souligne également le rôle essentiel des facteurs économiques, sociaux et environnementaux dans la façon dont les aliments arrivent dans nos assiettes. » (FAO, 2025).



Dans cet article nous nous intéressons, tout d'abord, à la représentation des acteurs sur le rôle de la bioéconomie circulaire dans les transitions des systèmes agroalimentaires. Puis, aux projets de bioéconomie circulaire mis en place pour identifier les principales stratégies de transitions par la bioéconomie circulaire portées par les acteurs du système agri-alimentaire de l'île de La Réunion.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Etude de cas multiples des projets de bioéconomie circulaire

Ce travail repose sur une étude de cas multiples. L'étude de cas est une démarche d'« enquête empirique qui examine un phénomène contemporain en profondeur et dans son contexte réel, en particulier lorsque les frontières entre le phénomène et le contexte ne sont pas clairement évidentes » (Bartlett and Vavrus, 2017). Ici, nous étudions plusieurs cas, correspondant aux différents projets de transition par la bioéconomie circulaire à La Réunion. Ces projets sont menés par différents acteurs du système agroalimentaire et de gestion des déchets. L'approche par étude de cas multiples est particulièrement adaptée à notre recherche, car elle permet d'analyser des phénomènes concrets et contemporains, même en présence de données limitées. Elle offre également une meilleure compréhension des différentes dynamiques et complexités liées à leur mise en œuvre (Alexandre, 2013).

La collecte des données s'est déroulée en trois grandes étapes. Tout d'abord, huit chercheurs ont participé à une cartographie des acteurs afin d'identifier les principaux acteurs impliqués dans les projets de bioéconomie circulaire. Ce repérage a été facilité par la participation des chercheurs au projet multi partenarial GABIR (2017-2020) qui a traité de la gestion des biomasses agricoles et urbaines dans une perspective d'économie circulaire (Vigne *et al*, 2021). À partir de cette analyse, nous avons sélectionné 38 acteurs du système agri-alimentaire à interviewer (tableau 1).

Tableau 1 : Acteurs du système agri-alimentaire interviewés

ACTEURS	NOMBRE D'ENTRETIENS
Organismes publics	7
Interprofession animale et végétale	3
Coopératives animales et végétales	6
Fournisseurs d'aliments pour animaux et de végétaux	2
Réseau d'innovation et de transfert agricole	2
Agriculteur	1
Fournisseur de légumes	1
Grande et moyenne surface	1
Syndicat de gestion des déchets	1
Associations (horticulture, agro-industrie, maraichage biologique et pastoralisme)	4
Réseau de compostage	1
Agro-industrie	2
Entreprise de production d'énergie	1
Bureau d'étude	2
Entrepreneur (start-ups)	2
Centres de recherche scientifique et technique	2

Puis, de mai à juillet 2023, nous avons réalisé 38 entretiens semi-directifs avec des acteurs du système agri-alimentaire de La Réunion. Nous avons privilégié une posture compréhensive et des questions ouvertes pour permettre aux participants de s'exprimer avec une plus grande liberté. Ces entretiens ont

duré entre 1h30 et 2 heures et se déroulaient en deux parties. La première visait à identifier les représentations des participants sur le rôle perçu de la bioéconomie circulaire dans la transition du territoire. La seconde partie s'inspirée des travaux de Geels (2004) et Casagrande *et al.* (2023) pour caractériser de manière plus fine les projets de bioéconomie circulaire qu'ils portaient en s'intéressant à différents éléments associés au contexte d'émergence et au développement de ces initiatives (Figure 1) :

- paysage du projet : facteurs contextuels, de nature sociale, économique et environnementale, contribuant à l'émergence des projets ;
- politiques publiques (normes et règles) à l'échelle européenne et national associés à l'émergence des projets ;
- acteurs et leurs rôles dans les projets (financeurs, partenaire technique, etc.)

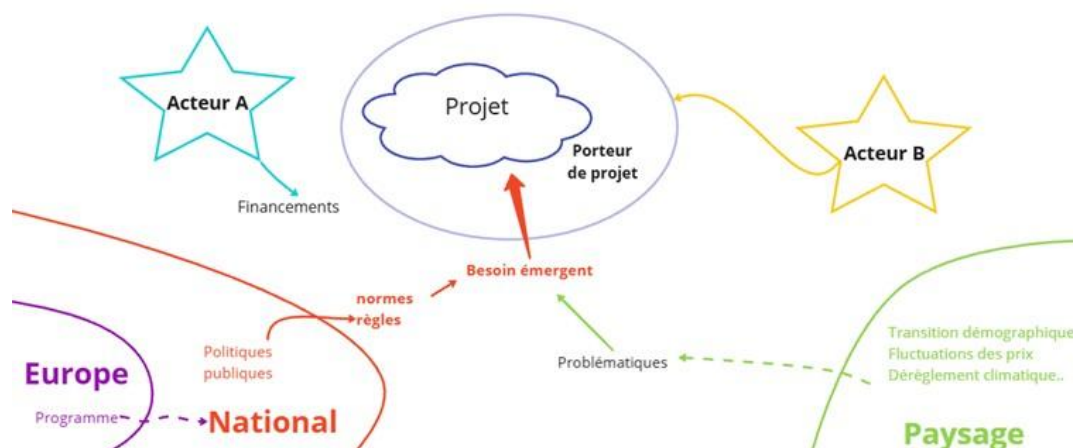


Figure 1 : Schéma générique représentant le contexte d'émergence et mise en place des projets de bioéconomie circulaire (Source : Jacquet, 2023)

Enfin, nous avons animé un atelier d'une journée complète, organisé en 5 groupes thématiques, auquel 30 des participants interviewés ont pu participer. Cet atelier avait pour but de confirmer, corriger et compléter notre analyse.

2.2. Analyse de données

Les entretiens ont été anonymisés, et les informations recueillies lors des enquêtes et des ateliers ont été retranscrites manuellement. Afin d'obtenir une vision globale des situations complexes étudiées, nous avons procédé à une triangulation des données (Fusch *et al.*, 2018). Cette méthode a également permis de vérifier la validité des déclarations des participants. Par ailleurs, nous avons mené une analyse thématique en classant les informations collectées selon les (i) représentations des acteurs sur le rôle de la bioéconomie circulaire dans les transitions des systèmes agroalimentaires et les (ii) stratégies de bioéconomie circulaire mises en place dans le cadre des projets :

- (i) Les représentations, reflétant les croyances et imaginaires des acteurs, ont été analysées à travers le prisme du principe des « 9 R » (Kirchherr *et al.* 2017) qui synthétise l'ensemble des activités associées à l'économie circulaire : Refuser, Repenser, Réduire, Réutiliser, Réparer, Remettre à neuf, Remanufacturer, Recycler et Récupérer. La fréquence d'apparition de chacun de ces principes dans les réponses a ensuite été quantifiée. Les « verbatim » extrait des réponses des interviewés sont mobilisés pour l'illustrer les messages clés de leurs représentations ;



- (ii) L'analyse du contexte d'émergence et de développement de ces projets de bioéconomie circulaire, les ressources et acteurs mobilisées ainsi que les finalités ont permis d'identifier les principales stratégies de bioéconomie circulaire dans le système agri-alimentaire de La Réunion.

3. Résultats

3.1. Les représentations des acteurs sur le rôle de la bioéconomie circulaire dans les transitions des systèmes agri-alimentaires

Tous les acteurs interrogés ont affirmé avoir déjà entendu parler de bioéconomie circulaire. Au total, 6 principes que l'on retrouve dans le modèle de Kirchherr *et al.* (2017) se retrouvent dans les définitions données, lesquels sont illustrés sous forme de verbatims dans le tableau 2. « Repenser » est le principe le plus mentionné par les acteurs (32 fois). Il a été associé à (i) repenser la nouvelle utilisation des ressources : « *il s'agit de valoriser la biomasse locale pour réduire la dépendance extérieure de l'île* » ; (ii) repenser la réorganisation des acteurs entre eux : « *C'est l'économie locale avec le moins d'intermédiaires possibles* » ; (iii) repenser les modes de vie des consommateurs : « *la (bio)économie circulaire, elle commence au niveau du consommateur* ». Le principe « réduire » a été mentionné 9 fois, axé sur la réduction de la production de déchets et des émissions de gaz à effet de serre : « *Il s'agit de réduire les déchets, d'utiliser le moins de ressources possible en amont* ». Seuls 3 acteurs ont mentionné la : « *réduction des émissions de gaz à effets de serre* » comme l'objectif final à la mise en place d'une économie circulaire. Le principe « reconvertir » a également été mentionné 9 fois : « *Il s'agit de réinjecter les déchets dans les boucles d'utilisation des produits* ». Enfin, les principes de « Réutilisation », « Recyclage » et « Reconditionnement » ont été les moins cités. L'analyse des représentations des acteurs a également révélé très peu de mentions explicites du terme biomasse dans leurs définitions de bioéconomie circulaire. Enfin, l'analyse des entretiens a également révélé qu'il n'y avait pas de définition pratique consensuelle sur la manière dont on mettait en place la bioéconomie circulaire dans le cadre d'un système agri-alimentaire.

Tableau 2 : Principes des 9 Rs associés aux dire des acteurs sur la bioéconomie circulaire

PRINCIPES (ORDRE DECROISSANT)	NOMBRE DE MENTIONS	VERBATIMS ASSOCIES
Repenser	32	« C'est une coordination d'acteurs », « c'est relocaliser, avoir une économie de proximité », « une économie qui commence au niveau du consommateur »
Réduire	9	« C'est éviter d'avoir des déchets, utiliser le moins de ressources et les valoriser au mieux »
Reconvertir	9	« C'est passer d'un déchet à une ressource, sortir de la logique du déchet, lui redonner de la valeur »
Réutiliser	6	« C'est la réutilisation, du réemploi de matériaux »
Recycler	4	« C'est la capacité à recycler ce qu'on produit en utilisant la filière adaptée »
Reconditionner	4	« C'est réinjecter le déchet dans les boucles d'utilisation de produits »



3.2. Projets et Stratégies de transition par la bioéconomie circulaire

Nous avons identifié 20 projets⁶ que nous avons regroupés dans 3 stratégies de transition par la bioéconomie circulaire (Tableau 3). La première est la substitution de matériaux importés par des matériaux locaux, la seconde vise à favoriser la consommation de produits alimentaires locaux et la troisième consiste à développer le recyclage de la matière organique locale.

Tableau 3 : Projets et stratégies de bioéconomie circulaire portés par des acteurs du système agri-alimentaire

STRATEGIES	PROJETS
Substituer les matières importées par des matières locales	Alternatives à la tourbe horticole, Alternative à la litière animale importée par une litière à base de paille de canne, Substituer l'import de concentrés par la mise en place d'une « Banque fourragère », Alternative au paillage plastique par un paillage biodégradable local, Conception locale de filet anti-ravageurs, Substituer le charbon par des pellets de bois, Produire localement des biostimulants pour la canne à sucre
Favoriser la consommation de produits alimentaires locaux	Label garantissant la production locale, Construction d'un magasin de vente de proximité, Projets alimentaires territoriaux, Activités de sensibilisation à l'alimentation biologique et locale dans les écoles
Développer le recyclage de la matière organique	Méthanisation, (Co)-compostage, Séparation de phase de lisier de porc, Sensibilisation des agriculteurs sur l'utilisation de la biomasse, Création d'une base de données pour faciliter la construction des plans d'épandage des effluents d'élevage, Création d'un comité de gestion des effluents d'élevage, Production d'un fertilisant à partir de déchets de poissons, Recensement de toutes les biomasses et de ses différents usages, Création d'une plateforme numérique d'échange de biodéchets agroalimentaires

La première stratégie est principalement soutenue par des acteurs privés qui cherchent à substituer des matériaux importés depuis d'autres territoires dont la France métropolitaine. C'est notamment le cas du projet de mise en place d'une banque fourragère où 2 coopératives bovines, avec l'appui de l'Association Réunionnaise de Pastoralisme, tentent de se coordonner pour stocker une partie du fourrage produit pendant la saison des pluies afin de satisfaire les besoins des éleveurs pendant la période déficitaire (saison sèche) et réduire l'usage de concentrés importés (Vigne *et al*, 2021). C'est aussi le cas pour la mise en place d'un paillage biodégradable local substituant un paillage plastique importé utilisé pour le maraîchage ou encore la fabrication de litières animales pour les volailles à partir de biomasses de l'île (paille de canne et copeaux de bois des scieries). On y retrouve également un des acteurs principaux du secteur énergétique de l'île (Albioma) qui cherche à augmenter son approvisionnement avec des biomasses locales (Ex : résidus de production de canne à sucre, produits ou coproduits de la filière bois). Cet acteur a substitué le charbon utilisé la moitié de l'année pour produire de l'électricité par des pellets de bois importés, pour atteindre l'objectif de 100 % d'énergie renouvelable. De même, une association pour appuyer le développement de la production horticole (ARMEFLHOR) a remplacé la tourbe importée par un compost avec des ressources locales (copeaux de bois, écorces de cryptomeria et bois raméaux fragmentés) comme support de boutures.

La seconde stratégie identifiée vise à faire évoluer les habitudes alimentaires des consommateurs, en les encourageant à consommer davantage de produits locaux. Les initiatives identifiées sont des activités principalement portées par les acteurs du secteur public (communes, département, région et Etat). Ces initiatives regroupent un ensemble d'activités ayant pour but de sensibiliser les

⁶ Pour plus d'informations sur les projets d'économie circulaire voir Jacquet, 2023 et Kouadio, 2023 indiqués dans les références bibliographiques.



consommateurs et de les rapprocher géographiquement des producteurs : potager dans les écoles, jardin partagé, activités de tri, dégustation de « légumes lontans » (d'autrefois, en créole), approvisionnement des cantines scolaires avec des produits locaux. Un autre levier pour encourager la consommation de viande locale, mis en place par une interprofession animale avec un important appui de l'Etat (via les aides POSEI⁷), est la création d'un programme qui permet de soutenir les filières d'élevage locales et d'inciter la consommation des produits *via* une subvention pour baisser les prix des produits locaux. Dans cette stratégie, il y a également un projet de magasin de proximité porté par une coopérative animale permettant la vente directe en sortie d'abattoir. Selon la coopérative, la réduction des intermédiaires au niveau de la filière permet de rendre les produits moins chers pour les consommateurs et de réduire l'utilisation d'emballages plastiques.

Enfin, la troisième stratégie rassemble les projets qui permettent de valoriser directement ou indirectement la matière organique par le recyclage. Ces projets sont portés par des acteurs privés et concernent principalement le compostage et la méthanisation. Ils sont notamment portés par les filières de traitement de déchets et les coopératives du secteur animal. Ces dernières, soucieuses d'accompagner leurs adhérents dans le traitement des effluents d'élevage, participent à la mise en place de plateformes de traitement individuelles et collectives d'effluents par la production de composts ou d'amendements. Les deux acteurs principaux des filières déchets à La Réunion développent des projets de grande envergure et multi-filières alliant compostage et méthanisation afin d'éviter l'enfouissement des déchets en réponse à des évolutions réglementaires. Ces processus sont (ou seront pour la méthanisation) réalisés avec les broyats de déchets verts, issus de la collecte chez les particuliers et les restes de repas des cantines et des ménages. Enfin, cette stratégie rassemble également des projets de nature organisationnelle avec la création d'arènes d'échange pour encourager la valorisation des effluents d'élevage. C'est le cas du comité de gestion des effluents qui permet de réunir différents acteurs des filières animales et végétales pour partager des connaissances, mettre les acteurs en réseau, co-construire des connaissances et des actions pour une meilleure gestion des effluents d'élevage. Il en est de même d'un projet de recensement et de centralisation des plans d'épandages (Satege), conduit par la chambre d'agriculture, qui est censé aboutir à la création d'un outil d'aide à la décision permettant de mettre en relation des éleveurs et des agriculteurs afin de valoriser les effluents d'élevage pour des cultures. Les acteurs de la recherche semblent également jouer un rôle important dans la sensibilisation et la construction de connaissances locales favorisant les stratégies de valorisation de la matière organique par le recyclage.

4. Discussion

En ce qui concerne la représentation du concept de bioéconomie circulaire, nos résultats montrent tout d'abord que les acteurs en ont déjà entendu parler. Par contre, ils l'associent à différents principes. Repenser est le principe le plus souvent associé à celui de la bioéconomie circulaire suivi de réduire, reconverter, réutiliser, recycler et reconditionner. Nos résultats rejoignent ceux de travaux antérieurs mettant en avant le rôle du concept de bioéconomie comme levier de dialogue essentiel pour repenser les systèmes agri-alimentaires à l'échelle des territoires (Koppelmäki *et al.*, 2021 ; Allain *et al.* 2022).

Nos résultats montrent également qu'une grande diversité d'acteurs mettent en place des projets de bioéconomie circulaire afin d'accompagner la transition des systèmes agroalimentaires. Ces projets peuvent être portés individuellement, mais ils sont majoritairement collectifs et incluent des acteurs des différents secteurs : énergie, forêt, agriculture, alimentation et de traitements de déchets. Ils peuvent

⁷ Le Programme d'options spécifiques pour l'éloignement et l'insularité (POSEI) est un programme européen destiné aux régions ultrapériphériques de l'Union européenne. Il vise à soutenir le développement agricole en accordant des subventions aux secteurs financiers locaux et en offrant une aide pour réduire les coûts d'importation de certains produits.



bénéficier ou pas d'un soutien des pouvoirs publics. Ce soutien est plus souvent d'ordre financier mais, dans certains cas, il accompagne la mise en place des projets de bioéconomie et coordonne l'action collective dans le cadre des projets multi acteurs. Enfin, nos résultats illustrent des conclusions de travaux récents (Schipfer *et al.*, 2024) sur une tendance croissante à la collaboration intersectorielle dans les projets de bioéconomie circulaire avec un soutien public jouant un rôle clé, tant au niveau financier que dans la coordination des actions collectives.

Nous avons également identifié 3 principales stratégies de bioéconomie circulaire mises en place par les acteurs du système agri-alimentaire réunionnais : Substituer les matières importées par des matières locales, favoriser la consommation de produits alimentaires locaux, développer le recyclage de la matière organique. Ces stratégies de bioéconomie circulaire ont également été mises en avant dans certains travaux récents (voir Salvador *et al.*, 2023). Elles participent directement à la réduction de l'importation massive de matériaux sur l'île et renforcent la circularité en son sein. Ces constats sont alignés avec ceux des nombreux travaux s'intéressant à la mise en place d'une économie circulaire autour des biomasses dans le contexte insulaire de La Réunion (Vigne *et al.*, 2022 ; Kleinpeter *et al.*, 2023 ; Alvanitakis *et al.*, 2024).

La démarche par études de cas multiples employée nous semble complémentaire des approches métaboliques (s'intéressant majoritairement à la caractérisation des flux de matières et d'énergie) de la transition par la bioéconomie circulaire. En fait, elle permet d'apporter un regard complémentaire sur la complexité opérationnelle des processus de transition en tant que phénomènes sociétaux concrets et contemporains. Elle permet une caractérisation fine des acteurs des transitions, de leurs pluralités de représentations et des manières dont ils s'associent ou pas autour de différents projets et stratégies de transitions. Notre démarche de collecte de données en trois étapes (cartographie des parties prenantes, entretiens individuels et ateliers thématiques collectifs) nous semble également pertinente. Commencer par une cartographie collective des parties prenantes permet de mieux identifier les acteurs clés de ces transitions et les interlocuteurs appropriés. Les entretiens individuels permettent de bien décrire les différents projets et de bien appréhender les différentes dynamiques et complexités liées à leur mise en œuvre. Enfin, les ateliers thématiques permettent de confronter nos analyses et interprétations aux représentations des acteurs afin de les confirmer, corriger et les compléter.

5. Conclusion

L'économie circulaire est un concept qui prend une place croissante à différents niveaux. Dans les politiques publiques européennes et nationales, elle est présentée comme un moyen pour atteindre les objectifs fixés à l'horizon 2050 en Europe face aux enjeux climatiques, énergétiques *et* alimentaires. Pour autant, telle qu'elle est décrite, elle n'en reste pas moins floue. Notamment quand il s'agit de la branche de l'économie circulaire traitant de la biomasse (la bioéconomie circulaire). Toutefois, la majorité de la littérature scientifique s'intéresse au secteur industriel mais très peu aux systèmes agri-alimentaires. Or, les biomasses sont des ressources renouvelables, au cœur des enjeux de transition dans les systèmes agri-alimentaires. Cela est d'autant plus vrai à La Réunion, dans un contexte insulaire avec une forte dépendance à l'importation et une pression accrue sur les ressources.

Notre travail montre que les acteurs du système agri-alimentaire de l'île, sont de plus en plus conscients de la valeur que représentent cette biomasse et de l'importance de la mise en place de la bioéconomie circulaire en tant que moyen pour repenser les transitions territoriales. Il montre également que ces acteurs ont développé des projets de bioéconomie circulaire qui répondent à leurs besoins. Que ce soit pour des préoccupations de gestion d'effluents d'élevage, de valorisation de biodéchets pour la fertilisation des cultures, de gestion des fourrages et de création de revenus complémentaires, ils participent à l'autonomisation du territoire en limitant les importations. En réponse, les initiatives développées peuvent être regroupées dans trois grandes stratégies de bioéconomie circulaire à l'échelle du territoire. Dans cette transition, les autorités, les agences et la recherche publiques tentent



d'encourager ces acteurs en identifiant les biomasses valorisables et en sensibilisant à de nouveaux usages. Pour autant, certains projets rencontrent des freins voire des verrouillages de plusieurs natures qui peuvent conduire à leur abandon. Des recherches complémentaires sont conduites pour approfondir les facteurs de réussite ou d'échec et les motifs d'abandon des projets, en particulier en identifiant les différents verrouillages empêchant les transitions.

Notre travail soulève également certains points de vigilance quant aux transitions par la bioéconomie circulaire. Tout d'abord, la contribution à accroître la concurrence pour certaines biomasses avec un fort impact sur certains usages minoritaires, plus traditionnels ou avec plus de bénéfices pour l'environnement. Lors des entretiens, les acteurs ont souligné que l'utilisation des biomasses semble actuellement privilégier une valorisation énergétique, au détriment d'autres formes d'utilisation. Ce ressenti s'est particulièrement manifesté lors de l'élaboration de documents d'orientation de certaines politiques publiques, où les acteurs du système agri-alimentaire ont eu le sentiment d'avoir été peu impliqués dans le processus de réflexion. De plus, dans le cas du schéma régional de la biomasse, l'orientation affichait clairement une légitimation de l'affectation de certains gisements de biomasse à des usages énergétiques. Or, les pouvoirs publics doivent être vigilants quant aux impacts des projets ou stratégies de bioéconomie circulaire dans l'ensemble d'un territoire en ayant un regard plus systémique et moins sectoriel des projets. Une première étape serait la co-construction d'un cadre pour définir et développer la bioéconomie circulaire dans le système agri-alimentaire en rendant opérationnel le principe des hiérarchies d'usage. L'adoption d'un cadre de référence territorial avec les acteurs locaux serait importante pour le développement d'une économie circulaire efficiente dans le système agri-alimentaire en tenant en compte des besoins et préférences pour l'avenir du territoire. Enfin, dans un contexte d'insularité très contraint, une perspective serait également d'élargir le périmètre de réflexion à une échelle plus large (e.g. la zone Océan Indien dans le cas de la Réunion) afin de permettre l'émergence de filières qui ne peuvent se développer qu'à une échelle supra tout en contribuant au développement des territoires voisins.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Tiago TEIXEIRA DA SILVA SIQUEIRA : <https://orcid.org/0000-0003-0285-9903>

Clément JACQUET : <https://orcid.org/0009-0004-3185-9501>

Kassi Ange Emmanuel KOUADIO : <https://orcid.org/0009-0007-4571-8891>

Jean-Philippe CHOISIS : <https://orcid.org/0000-0003-2343-4779>

Contributions des auteurs



Conceptualisation, Recherche, Méthodologie, Validation, Rédaction, révision et correction : ensemble des auteurs ; Curation des données, Analyse formelle, Visualisation : Clément JACQUET, Kassi Ange Emmanuel KOUADIO ; Obtention du financement, Administration du projet, Fourniture de ressources, Supervision : Tiago TEIXEIRA DA SILVA SIQUEIRA, Jean-Philippe CHOISIS

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement la disponibilité des différents acteurs interviewés et ceux qui ont participé à l'atelier collectif de novembre 2023.

Déclaration de soutien financier

Cette recherche a été réalisée dans le cadre de l'accord-cadre entre le Cirad, la Région Réunion, le Département de La Réunion et le Ministère français de l'Agriculture et de l'Alimentation (DAAF), dans le cadre du projet « Compromis en Agriculture pour un Territoire Durable » (CAPTERRE), financé par l'Union Européenne et la Région Réunion dans le cadre du programme FEDER. Ces travaux ont été cofinancés par l'Agence française de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME).

Références bibliographiques

- Alexandre M., 2013. La rigueur scientifique du dispositif méthodologique d'une étude de cas multiple. *Recherches qualitatives* 32, 26-56.
- Alvanitakis M., Kleinpeter V., Vigne M., Benoist A., Vayssières J., 2024. A substance flow analysis to assess the potential benefits of livestock based circularity for nutrient use efficiency and carbon return to soils in the agro-food-waste system of a tropical island, *Agricultural Systems*, 219, 104046.
- Allain S., Ruault J.-F., Moraine M., Madelrieux S., 2022. The 'bioeconomics vs bioeconomy' debate: Beyond criticism, advancing research fronts. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 42, 58–73.
- Bartlett L., Vavrus F., 2017. Comparative Case Studies. *Educação & Realidade* 42, 899–920.
- 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. INRAE, 66p. <https://doi.org/10.17180/w78m-dn95>
- Decree No. 2016-1134 of August 19. Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse.
- DEAL Réunion, 2021. Feuille de Route Economie Circulaire de La Réunion. <https://www.reunion.developpement-durable.gouv.fr/feuille-de-route-economie-circulaire-frec-de-la-a1023.html> (accès : 12.02.24).
- DAAF La Réunion-douanes, 2019. Extractions base des douanes année 2018.
- FAO, 2024. Guidelines on the role of livestock in circular bioeconomy systems.
- FAO, 2025. <https://www.fao.org/evaluation/highlights/agri-food-systems/en> (accès 10/01/2025).
- Flynn A., Hacking N., Xie L., 2019. Governance of the circular economy: A comparative examination of the use of standards by China and the United Kingdom. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 33, 282–300.
- Fusch P., Fusch G.E., Ness L.R., 2018. Denzin's Paradigm Shift: Revisiting Triangulation in Qualitative Research, *Journal of Social Change*, 10 (1).
- Geels F., 2004. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy* 33, 897–920.



Giampietro M., Funtowicz S.O., 2020. From elite folk science to the policy legend of the circular economy. *Environmental Science & Policy* 109, 64–72.

Insee, 2022. Commerce extérieur - Des importations et exportations très dynamiques en 2021 - Bilan économique 2021 - La Réunion <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6451824?sommaire=6324763> (accès 12.10.24).

Jacquet, C. 2023. Coexistence et gouvernance des transitions vers une économie circulaire dans le système agri-alimentaire de La Réunion. Montpellier : Institut Agro Montpellier, 142 p. Mémoire de fin d'études : Systèmes agricoles et agroalimentaires durables au Sud (SAADS). Marchés organisations qualités et services en appui aux agricultures du sud (MOQUAS) : Institut agro Montpellier

Kleinpeter V., Alvanitakis M., Vigne M., Wassenaar T., Lo Seen D., Vayssières J. 2023. Assessing the roles of crops and livestock in nutrient circularity and use efficiency in the agri-food-waste system: A set of indicators applied to an isolated tropical island. *Resources, Conservation and Recycling*, 188, 106663.

Kirchherr J., Reike D., Hekkert M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 221–232.

Koppelmäki K., Helenius J., Schulte R.P.O., 2021. Nested circularity in food systems: A Nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent, *Resources, Conservation and Recycling* 164.

Kouadio K.A.E., 2023. Représentations et Appropriation des transitions vers une économie circulaire : cas des acteurs des filières animales dans le contexte insulaire réunionnais. Montpellier : Institut Agro Montpellier, 126 p. Mémoire de fin d'études : Systèmes agricoles et agroalimentaires durables au Sud (SAADS). Marchés organisations qualités et services en appui aux agricultures du sud (MOQUAS) : Institut agro Montpellier

Leipold S., Petit-Boix A., Luo A., Helander H., Simoens M., Ashton W., Babbitt C., Bala A., Bening C., Birkved M., Blomsma F., Boks C., Boldrin A., Deutz P., Domenech T., Ferronato N., Gallego-Schmid A., Giurco D., Hobson K., Xue B., 2021. Lessons, narratives and research directions for a sustainable circular economy. *Journal of industrial ecology*, 27 (1), 6-18.

Madelrieux S., Redlingshofer B., 2023. Métabolisme associé aux systèmes agri-alimentaires : enjeux et diversité d'approches dans la communauté de recherche française. *Cahiers Agricultures*, 32, pp.8.

Philp J., Winickoff D.E., 2018. Realising the circular bioeconomy. *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*.

Russeil V., Lo Seen D., Broust F., Bonin M., Praene J.-P., 2023. Food and electricity self-sufficiency trade-offs in Reunion Island: Modelling land-use change scenarios with stakeholders, *Land Use Policy*, 132, 106784

Salvador R., Barros M. V., Pieroni M., Silva D. A. L., Freire F., De Francisco A. C., 2023. Overarching Business Models for a Circular Bioeconomy: Systematising archetypes, *Sustainable Production and Consumption*, 43, 349-362, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.11.010>.

Siqueira T.T.S., Choisis J.P., Vayssières J., Miralles-Bruneau M., Edouard-Rambaut L.-A., Alvanitakis M., Jacquet C., Vigne M., 2025. Reconsidérer les rôles de l'élevage dans le développement durable des territoires insulaires : le cas de l'île de La Réunion. In: K. Alinon, G. Duteurtre, J. Lasseur, R. Pocard-Chapuis (eds), *Élevages et pâturages sous tension Nouveaux regards sur la place de l'élevage dans les territoires.*, Collection Matière à débattre et à décider. QUAE Editions, Versailles.

Schipfer F., Burli P., Fritsche U., Henning C., Stricker F., Wirth M., Proskurina S., Serna-Loaiza S. 2024. The circular bioeconomy: a driver for system integration. *Energy, Sustainability and Society*, 14 (34).

Upadhayay S., Alqassimi O., Khashadourian E., Sherm A., Prajapati D., 2024. Development in the Circular Economy Concept: Systematic Review in Context of an Umbrella Framework. *Sustainability* 16, 1500.

Urcoopa, 2019. Données communiquées lors de la collecte de données réalisée dans le cadre du projet GABIR.

Vigne M., Achard P., Alison C., Castanier C., Choisis J.-P., Conrozier R., Courdier R., Degenne P., Deulvot A., Dupuy S., Février A., Hatik C., Huat J., Kleinpeter V., Kyulavski V., Lurette A., Payet A.L., Rondeau P., Soulié J.C., Thomas P., Thuries L., Tillard E., Van de Kerchove V., Vayssières J., 2021. Une agronomie clinique et



territoriale pour accompagner la transition vers une économie circulaire autour de l'agriculture : mise à l'épreuve et enseignements du projet GABiR à La Réunion, *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 11 (2), 16 p.

Yin R.K., Campbell D.T., 2018. *Case study research and applications: design and methods* (Sixth Edition), Thousand Oaks, California: SAGE Publications, Inc., 319 p.

Pour citer cet article : Tiago Teixeira da Silva Siqueira, Clément Jacquet, K Kouadio, Jean-Philippe Choisis. Acteurs, représentations et stratégies dans les transitions par la bioéconomie circulaire du système agri-alimentaire de l'île de La Réunion. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.82-93. [10.17180/ciag-2025-vol106-art07](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art07)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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

Existe-t-il des verrouillages sociotechniques freinant l'intégration culture-élevage ? Un cas d'étude en Guadeloupe

Audrey FANCHONE¹, Damaris STERLING¹, Jean-Philippe CHOISIS², Jean-Marc MEYNARD³

¹ UR ASSET, INRAE, Prise d'Eau, 97170, Petit-Bourg, Guadeloupe, France

² UMR SELMET, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Station de Ligne-Paradis - Pôle élevage - 7 chemin de l'IRAT - 97410 Saint-Pierre, Réunion, France

³ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR SAD-APT, 22 Place de l'agronomie, Bâtiment F, 20040, 91123 Palaiseau cedex, CS, France

Correspondance : audrey.fanchone@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art08>

Résumé

Les pratiques d'intégration culture-élevage sont souvent mises en avant comme des moyens d'accroître l'autonomie des exploitations et des territoires. Cependant, malgré leur potentiel, ces pratiques sont très peu mobilisées. En Guadeloupe, elles ont perduré dans de petites exploitations familiales orientées vers l'agroécologie et l'agriculture biologique. La méthodologie du diagnostic sociotechnique nous a permis d'identifier les principaux freins au développement des pratiques d'intégration, et de proposer des leviers. Le manque de connaissance sur ces pratiques, les difficultés d'organisation des acteurs, l'organisation et la pénibilité du travail, l'absence de matériel adapté et l'inadéquation des politiques publiques seraient les principaux freins au déploiement de ces pratiques. Ce travail débouche sur quelques recommandations, concernant en particulier une action publique soutenue sur le temps long.

Mots-clés : Intégration culture-élevage, freins, leviers, tropiques, caraïbe

Abstract: Socio-technical lock-ins to crop-livestock integration: Case study in Guadeloupe

Crop-livestock integration practices are often put forward as a means of increasing autonomy at farm and regional scales. However, despite their potential, these practices are rarely implemented. In Guadeloupe, they have persisted on small family farms oriented towards agroecology and organic farming. The sociotechnical diagnosis methodology enabled us to identify the main obstacles to the development of integration practices, and to propose levers. Lack of knowledge about these practices, difficulties in organizing stakeholders, the organization and arduousness of work, the absence of suitable equipment and the inadequacy of public policies would be the main obstacles to the deployment of these practices. This work leads to a number of recommendations, in particular concerning sustained public action over the long term.

Keywords: Crop-livestock integration, barriers, levers, tropics, Caribbean

1. Introduction

Depuis plus d'un demi-siècle, sous l'effet du développement de l'usage d'intrants de synthèse et de la spécialisation des systèmes de production, l'agriculture a considérablement accru sa productivité. De nos jours, cependant, le modèle d'agriculture qui résulte de cette évolution est de plus en plus remis en question, en raison notamment de ses impacts négatifs sur l'environnement (lessivage et érosion des sols, diminution de la fertilité des sols, perte de biodiversité, pollution des eaux souterraines, émissions de gaz à effet de serre, ...). L'agriculture contemporaine doit proposer des solutions pour éviter ces impacts négatifs, voire les transformer en impacts positifs. Dans ce contexte, l'agroécologie propose de



produire en s'appuyant sur les mécanismes observés dans les écosystèmes naturels. Il s'agit notamment de reconnecter la production végétale et animale afin de réduire le besoin en intrants exogènes, tout en préservant les ressources (Altieri et Koohafkan 2008). Les formes intégrées d'agriculture offriraient la possibilité de restaurer la durabilité des systèmes agricoles (Hendrickson *et al.* 2008 ; Bell et Moore 2012 ; Russelle, *et al.* 2007).

Les systèmes mixtes de polyculture élevage (SPE) se positionnent comme une alternative pour augmenter la production de biens alimentaires à l'échelle mondiale (Hendrickson *et al.* 2008 ; Stark *et al.* 2019 ; Herrero *et al.* 2010). La synergie entre les espèces végétales et animales, que nous désignerons dans la suite de cet article par l'expression « intégration culture-élevage » (ICE) permettrait d'augmenter les performances (autonomie, efficacité, résilience, ...) des systèmes agricoles (Stark *et al.* 2016). L'ICE repose sur l'utilisation des produits et sous-produits des cultures pour nourrir le bétail, la réduction des populations de parasites et adventices grâce au pâturage, l'utilisation des excréments des animaux pour fertiliser les cultures et l'utilisation des animaux comme force de traction. Dans le monde entier, il existe une grande variété spatiale et/ou temporelle dans les façons dont les pratiques contribuent à l'ICE. Les plus marquées étant l'intégration synchronisée par l'utilisation de cultures à double usage, l'intégration par rotation, les systèmes de coupe et de transport, ou la coordination inter-exploitations (Bell et Moore 2012). Cette variété de pratiques d'ICE génère différents types de SPE, qui s'inscrivent dans un continuum allant des « SPE ségrégués » ou « juxtaposés », avec un faible niveau d'interaction entre la culture et le bétail et une forte dépendance aux intrants externes, aux « SPE traditionnels », vieux de plusieurs siècles, et peu dépendants des intrants externes (Garrett *et al.* 2020). Dans les régions tropicales, les SPE sont encore enracinés dans le paysage, principalement dans les petites exploitations agricoles où ils fournissent aux ménages à la fois de la nourriture et des revenus (Herrero *et al.* 2010), alors que dans les zones tempérées, la tendance générale est encore au découplage des systèmes de culture et d'élevage (Ryschawy *et al.* 2012 ; Garrett *et al.* 2020).

L'agriculture biologique, un des modèles de l'agroécologie, s'est implantée très tardivement dans les départements et régions d'outre-mer (DROM), et contrairement à certaines productions végétales, les productions animales biologiques peinent à se développer. Elles constituent une diversification de gamme s'inscrivant dans un marché de niche (poules pondeuses, à la Réunion et en Guadeloupe, et dans une moindre mesure en Martinique, volailles de chair à la Réunion et en Guadeloupe). Ces productions ont très peu de lien au sol, à la faveur d'une dérogation leur permettant l'utilisation de ressources importées pour l'alimentation de animaux et la fertilisation des cultures.

En Guadeloupe, 80 % des exploitations sont déclarées en polyculture-élevage mais un faible niveau d'ICE est observé sur le territoire. La petite agriculture familiale est ancrée dans le territoire et reconnue comme le principal moteur d'une transition agroécologique profonde de la Guadeloupe (Guadeloupe, 2020). Nous faisons l'hypothèse que la petite agriculture familiale constitue une niche d'innovation pour le développement de l'ICE.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les déterminants agronomiques et sociotechniques qui sous-tendent l'ICE dans les SPE guadeloupéens, en identifiant les freins au développement des pratiques sous-jacentes, en particulier dans les exploitations biologiques.

2. Matériel et méthodes

Nous avons utilisé la méthode du diagnostic sociotechnique (Casagrande *et al.*, 2023) pour analyser les freins et leviers au développement des pratiques favorables à l'ICE dans les exploitations de polyculture-élevage. Elle repose sur 5 étapes interconnectées. Ces étapes ont été conduites (a) en mobilisant des experts des pratiques favorables à l'ICE, (b) en réalisant des enquêtes auprès des différents acteurs et parties prenantes de l'amont et de l'aval de la production, et (c) complétées par une analyse de la littérature scientifique et de la littérature grise, et en particulier des sources d'information consultables par les agriculteurs.



- **Étape 1 : délimiter le champ d'innovation**

L'objectif de cette étape est de cadrer le diagnostic, c'est-à-dire de définir le champ d'innovation et le périmètre du travail. Cette étape s'appuie sur un travail collectif mobilisant un groupe d'experts. Deux ateliers ont été réalisés avec 5 experts chacun. Deux ont été choisis pour leur connaissance historique de l'agriculture et du tissu agricole guadeloupéen. Un expert zootechnicien est spécialiste des pratiques d'alimentation des animaux d'élevage avec des ressources locales. Un expert agronome est spécialiste des pratiques de fertilisation des cultures avec des déjections animales. Un autre expert est spécialiste des systèmes de polyculture-élevage tropicaux. Ces ateliers nous ont permis de proposer une première formulation collective du champ d'innovation⁸ ainsi que les innovations techniques, organisationnelles et de politiques publiques qui pourraient accélérer le développement de l'ICE en Guadeloupe.

- **Étapes 2 et 3 : cartographie, pratiques et stratégies des acteurs concernés**

Dans l'étape suivante, les mêmes experts ont proposé une liste des acteurs impliqués dans les pratiques et les liens qui les relient. Pour cela, nous avons mobilisé différentes représentations de la diversité des acteurs de l'agro-industrie et des filières agricoles, issues de travaux antérieurs. Des entretiens semi-directifs avec ces acteurs et une analyse de la littérature grise ont été conduits pour déterminer les stratégies et les contraintes de chaque type d'acteurs.

- **Étapes 4 et 5 : identifier les freins collectifs, partager les résultats, réfléchir aux leviers**

La synthèse des données recueillies sur les stratégies et les contraintes des différents acteurs et la compréhension de leurs interactions permet de construire une vision systémique des freins à l'innovation. Cette vision systémique permet d'identifier les déterminants des pratiques à différentes échelles (parcelle, système de culture et d'élevage, exploitation agricole, filière, territoire). Cette analyse permet d'identifier des mécanismes d'auto-renforcement entre les freins qui conduisent à un verrouillage du système sociotechnique.

Des entretiens semi-directifs ont été menés avec les acteurs clés identifiés lors des étapes précédentes. Ces entretiens ont été préparés en anticipant les thèmes d'entretien et en préparant les grilles de recueil des informations en fonction des acteurs. Ces acteurs ont aussi identifié d'autres personnes ressources à enquêter ; nous avons poursuivi les entretiens suivant la méthode « boule de neige » jusqu'à ne plus avoir d'informations supplémentaires. Un total de 32 entretiens a été conduit dont 7 avec des agriculteurs considérés comme des référents en Guadeloupe sur les pratiques agroécologiques.

3. Résultats et discussion

3.1. Les pratiques favorables à l'ICE retenues pour l'étude

Différents travaux menés en Guadeloupe ont permis de caractériser les pratiques impliquées dans l'ICE, que ce soit en termes d'alimentation avec les ressources locales que de fertilisation avec des déjections (Stark *et al.*, 2016 ; Fanchone *et al.*, 2020, 2022a et b). L'utilisation de la canne et de la banane dans l'alimentation des animaux (ruminants ou monogastriques) et la fertilisation des cultures avec des fientes de poules sont des pratiques connues en Guadeloupe. Elles sont sujettes à controverse (tous les acteurs ont un avis dessus, qu'il soit positif ou négatif). Des travaux de traque aux

⁸ Le champ d'innovation est défini dans le cadre de processus d'innovations comme un espace où pourraient se développer des innovations (Casagrande *et al.*, 2023). Le champ d'innovation correspond au cadre d'un problème général complexe, au sein duquel plusieurs voies d'innovations coexistent. Il ne correspond pas à un objectif précisément défini, mais dont la construction se fait chemin faisant car on n'identifie pas encore les caractéristiques de la cible de conception (Casagrande *et al.*, 2023).



innovations, conduits en parallèle en Martinique et à La Réunion dans le cadre du projet Selbiodom⁹ montrent que ces pratiques sont aussi présentes dans les autres DROM, augmentant la généricité de ce travail (Fanchone *et al.*, 2022).

Alimentation des animaux avec la canne et la banane : La canne à sucre est disponible pendant la saison sèche où les ressources disponibles pour l'alimentation des animaux sont moindres. Sa teneur en sucre augmente durant cette saison, ce qui en fait un constituant intéressant au plan énergétique de la ration des animaux (Archimède *et al.*, 2011). Elle se divise en deux fractions ayant différentes valeurs alimentaires : les amarres et les tiges.

Les amarres constituent les parties herbacées de la canne. Elles sont de moins bonne valeur alimentaire que la canne entière, car moins riches en sucre. Les amarres sont traditionnellement utilisées pour nourrir les animaux. C'est un fourrage grossier qui contribue à la couverture des besoins d'entretien pendant la saison sèche. Leur récolte est le plus souvent manuelle.

Bien que des travaux de recherche aient montré le potentiel du jus de canne pour alimenter des animaux (Xandé *et al.*, 2010), son utilisation dans l'alimentation animale est restreinte. Les agriculteurs expliquent qu'ils préfèrent vendre le jus de canne sur les marchés locaux que la donner à un animal, car le gain immédiat sera plus important.

La banane est riche en énergie. Elle est traditionnellement utilisée dans la ration des porcins (Archimède *et al.*, 2011 ; Renaudeau *et al.*, 2014), mais peut aussi être utilisée en alimentation des ruminants. En 2013, un projet a rassemblé des acteurs du territoire autour de la production industrielle d'un aliment à base de banane pour les animaux d'élevage. Ainsi, le groupement des producteurs de bananes de Guadeloupe (LPG), INRAE, l'industriel Grands Moulin des Antilles (GMA), le fournisseur local d'aliments concentrés, et l'interprofession de la viande ont mené des études sur l'efficacité de l'alimentation à base de bananes pour les animaux d'élevage. Ils ont étudié la faisabilité d'un projet de transformation des bananes pour la production d'un aliment industriel comme substitut au maïs importé de France métropolitaine. La forte teneur en eau du fruit nécessite cependant l'utilisation d'un séchoir industriel pour la fabrication de l'aliment concentré. L'investissement requis a bloqué la mise en œuvre du projet, aucun acteur ne souhaitant prendre en charge ce matériel de séchage.

Fertilisation avec des déjections animales : En Guadeloupe, le fumier et le lisier sont souvent perçus comme les déchets des élevages, notamment dans les exploitations conventionnelles (c'est-à-dire non-bio). Les déjections animales sont pourtant une ressource très riche en matière organique, et elles constituent donc d'excellents amendements et/ ou fertilisants pour les sols. L'utilisation d'amendements issus de déjections animales est une pratique ancestrale qui était répandue, mais est en diminution suite à la spécialisation des exploitations, et à l'accès aux fertilisants minéraux. Le compostage et le vermicompostage permettent d'augmenter leurs qualités agronomiques.

3.2. Des freins identifiés grâce aux entretiens avec les acteurs

Les acteurs impliqués dans les freins au développement des pratiques d'ICE, identifiés par les experts, jouent des rôles divers dans les filières. On retrouve les acteurs de la production agricole (agriculteurs, entreprises de travaux agricoles), de l'aval (Société d'Initiatives et Coopération Agricoles, industriels), de la production et diffusion de connaissances (Centres de recherche), de soutien technique (Instituts techniques, RITA, Chambre d'agriculture), de structuration de la filière (interprofessions), et ceux impliqués dans l'élaboration des politiques publiques et de leur mise en œuvre. Des entretiens réalisés avec ces acteurs clés ont permis d'identifier différents freins au développement des pratiques favorables à l'ICE.

⁹ <https://metabio.hub.inrae.fr/rubriques-verticales/nos-actions/projets-exploratoires/selbiodom-projet-exploratoire-2020-2022>



Le manque de connaissances : Les éleveurs font état d'un manque de connaissances sur la manière d'implémenter les pratiques d'ICE : Comment constituer des rations équilibrées à base de ressources locales ? Quelles quantités à apporter de co-produits des cultures pour l'alimentation ou la gestion de la santé des animaux ? Quand et sous quelle forme apporter les amendements et fertilisants organiques ? Alors que des travaux de recherche ont été réalisés localement sur ces sujets. L'étude de la valeur alimentaire des ressources locales a débuté à l'INRA dès les années 1980 (Geoffroy *et al.*, 1980 ; Aumont *et al.* 1991). Une thèse a porté sur la valeur anthelminthique des ressources végétales tropicales (Marie-Magdeleine, 2009). Les travaux sur le compostage et le vermicompostage sont plus récents (Sierra *et al.*, 2012). En l'absence d'instituts techniques, créés en 2009, c'est l'INRA qui a pris en charge la diffusion de ces travaux. Des journées portes ouvertes et journées techniques ont été organisées régulièrement (en moyenne tous les trois ans) sur site (au centre INRAE Antilles Guyane) ou en milieu paysan, durant lesquelles des démonstrations étaient réalisées et des fiches techniques distribuées¹⁰. Des instituts techniques ont été créés en 2009 pour faciliter l'accès à l'innovation, et le transfert et la diffusion de références fiables et objectives. Ils ont été créés sur la base de l'organisation des filières existantes (IT2 en banane, CTCS en canne à sucre et ITEL pour l'élevage) avec une approche par secteur qui laisse très peu de place aux pratiques renforçant l'ICE. ITEL fait face à des difficultés de financement récurrentes liés au manque de structuration de l'élevage, et aux retards de paiement des aides européennes. Les Réseaux d'Innovation et de Transfert Agricole (RITA) ont été mis en place fin 2011, suite au Conseil Interministériel de l'Outre-Mer (CIOM) de 2009. Ils visent à accompagner le développement local des productions de diversification animale et végétale dans les Départements d'Outre-Mer (DOM). Ils regroupent l'ensemble des acteurs du dispositif Recherche-Formation-Développement des DOM, et ont pour objet de co-construire et de réaliser des actions de recherche et développement, d'expérimentation, de démonstration et de transfert en réponse aux besoins exprimés localement par les professionnels de l'agriculture.

Le manque de coordination entre les filières. Les acteurs expriment des difficultés à construire une filière associée aux pratiques d'ICE, notamment pour l'approvisionnement local en ressources, ou la démarcation de leurs produits. L'intensification et la spécialisation des exploitations agricoles s'est accompagnée d'une forte spécialisation régionale des filières agricoles pour mieux contrôler les qualités, les volumes, et les logistiques d'approvisionnement et de commercialisation (Meynard *et al.*, 2018). Le paysage agricole de la Guadeloupe est aujourd'hui marqué par les filières dominantes, orientées vers l'exportation (canne-sucre-rhum, banane dessert, melon), associées à une filière dite de diversification regroupant le maraîchage, les cultures vivrières, les fleurs et les PAPAM. Les filières canne-sucre-rhum et banane ont leurs structurations propres. L'Iguafhor, association interprofessionnelle de Guadeloupe fédère les acteurs des cultures de diversification. L'élevage est lui aussi segmenté par filière (bovine, petits ruminants, porcine, volailles de chair, poules, ...). L'Iguavie, interprofession viande, fédère les acteurs des productions animales. Aucun des acteurs enquêtés ne fait état d'une stratégie « filière » visant à accroître l'ICE. Néanmoins, conscients du potentiel des synergies cultures-élevage certains acteurs se sont fédérés autour de projets visant à identifier les gisements de biomasses et de déjections animales présents sur le territoire, ou encore pour valoriser le potentiel des animaux à rendre des services aux cultures (récolte directe des résidus, gestion de l'enherbement et des bioagresseurs, fertilisation directe des cultures, ...). Tous ces projets sont à l'initiative des instituts techniques tropicaux, qui représentent potentiellement un maillon fort dans la co-conception et le transfert d'innovations, mais sont apparus très récemment dans le paysage agricole Guadeloupéen.

¹⁰ Un site été dédié à la mise à disposition des fiches techniques a été inauguré en 2014, mais il a été fermé en 2020 au vu de son coût relativement au faible nombre de consultations. Les fiches sont aujourd'hui disponibles sur le site de l'institut.



Les difficultés d'organisation du travail. Les éleveurs apparaissent réticents à déléguer le travail avec les animaux, et notamment l'alimentation avec les ressources locales et trouvent les pratiques d'ICE trop pénibles. Ce frein, récurrent lors des entretiens avec les agriculteurs autour des pratiques d'ICE (et plus largement autour des pratiques agroécologiques) a fait l'objet d'une étude spécifique. Ces travaux ont montré que la perception qu'ont les agriculteurs du travail, en particulier avec les animaux, influence le niveau de mise en œuvre de ces pratiques. Dans certains cas, le travail avec le bétail est effectué par les agriculteurs eux-mêmes ou par des personnes qualifiées et de confiance appartenant à leur cercle proche. Dans d'autres cas, le lien avec les animaux est moins personnel, le bétail est considéré comme une source de revenus pour l'exploitation. Le travail avec le bétail, y compris les pratiques d'ICE, est alors souvent délégué à des employés ou à des aides. Quel que soit le modèle, le temps nécessaire à la collecte des produits de la culture et des excréments a été cité comme l'un des principaux facteurs limitant la mise en œuvre de ces pratiques (Fanchone *et al.*, 2022a).

Le manque de matériels adaptés : la majorité des pratiques d'ICE sont manuelles, ce qui explique que les exploitants les trouvent chronophages et pénibles. Les entreprises de matériel agricole s'investissent peu dans le développement d'une mécanisation adaptée à l'agroécologie tropicale, trouvant ce marché trop étroit (Dedieu *et al.*, 2019). Les entretiens laissent penser également que le coût supplémentaire lié à l'achat de nouveaux outils ne serait pas accepté par la plupart des exploitants. Longtemps, les autorités publiques locales ont refusé de soutenir le financement de la petite mécanisation (microtracteurs en particulier), en se basant sur le ratio nombre de chevaux/ SAU de la Guadeloupe. Or ce ratio est biaisé par les cultures dominantes (canne à sucre et banane) qui nécessitent des machines puissantes, pour le transport du champ à l'usine (pour la canne à sucre) ou du champ au lieu de conditionnement (pour la banane). Des collaborations avec « L'atelier Paysan », une coopérative spécialisée dans l'accompagnement des agriculteurs dans la conception et la fabrication de machines et de bâtiments adaptés à une agroécologie paysanne, ont été initiées, notamment par le groupement d'agriculteurs biologiques de Guadeloupe. Cette collaboration a été interrompue à cause de son coût : déplacement (France-Antilles), alimentation et hébergement pour les concepteurs, achat et acheminement des composants du matériel conçu. Les agriculteurs, même organisés en groupements peinent à trouver des instruments pour financer ce type d'initiatives.

Des politiques publiques mal ciblées. Le soutien aux pratiques agroécologiques relève principalement du deuxième pilier de la PAC, principalement au travers du Fonds européen agricole pour le développement rural (FEADER). Ces fonds sont regroupés dans un cadre stratégique commun défini par chaque État membre, qui se déploie sous la forme de programmes opérationnels de développement rural. Pour un exploitant, bénéficier de ces fonds publics nécessite d'en assurer la traçabilité, et suppose le dépôt d'un dossier complet incluant une comptabilité de l'exploitation. Or, la comptabilité des petites exploitations familiales, où sont le plus souvent mises en place les pratiques d'ICE (Fanchone *et al.*, 2020), fait souvent défaut car les exploitants ne peuvent s'assurer les services d'un comptable ou d'un bureau d'étude. L'incomplétude des dossiers serait selon les autorités publiques « l'un des premiers motifs de rejet des demandes de financement des exploitants ». Les autorités publiques, conscientes de ce frein, cherchent des stratégies pour accompagner les agriculteurs. Une animatrice FEADER a ainsi été recrutée pour accompagner les agriculteurs pour le dépôt de leur demande d'aide. Dans ce contexte, le fait qu'en 2014, la gestion du Plan Stratégique Régional du programme FEADER ait été transférée de la DRAAF à la Région Guadeloupe, laquelle n'avait pas les compétences, n'a pas simplifié la situation.

Le FEADER finance en particulier les mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC). Ce dispositif permet d'accompagner sur cinq ans les agriculteurs et agricultrices qui s'engagent dans la transition agroécologique (réduction des engrais et des pesticides, etc.). Néanmoins, les MAEC en Guadeloupe ne mentionnent pas explicitement les pratiques relatives à l'ICE, les politiques publiques en Guadeloupe étant pour la plupart orientées vers la réduction des pesticides, compte tenu des préoccupations locales concernant la contamination par la Chlordécone (Fanchone *et al.*, 2022c). Ces



instruments ont été pour la plupart récupérés par les systèmes dominants (Banane export et canne à sucre) pour soutenir leur propre agenda agricole et environnemental (Biabiany *et al.*, 2022).

3.3. Des mécanismes d'auto-renforcement, qui verrouillent le système

Nous observons donc de nombreux freins au développement des pratiques favorables à l'ICE dans les exploitations de polyculture-élevage de Guadeloupe : des exploitations souvent très petites qui n'ont pas les moyens de monter des dossiers pour bénéficier des financements publics pour l'achat de matériel ou leur auto-construction ; une charge en travail qui ne leur laisse pas le temps de tester et de s'approprier les techniques favorables à l'ICE ; celles-ci ne sont ainsi soutenues ni par les filières, ni par les collectifs d'agriculteurs, ni par les pouvoirs publics. Les filières Canne et Banane, mieux organisées, mobilisent plus facilement les soutiens publics, et leurs instituts techniques fédèrent les moyens disponibles dans des projets de filière. Nous identifions ainsi des mécanismes d'auto-renforcement qui confortent les orientations actuelles, et freinent le développement de fermes de polyculture élevage performantes, valorisant les ICE. Ces mécanismes d'auto-renforcement sont interconnectés, ce qui confère au système sociotechnique actuel une grande solidité. On peut illustrer ces interconnexions sur l'exemple de la pénibilité du travail, mise en avant par les agriculteurs comme facteur limitant le déploiement des pratiques d'ICE. Du petit matériel adapté aux petites exploitations agricoles existe dans d'autres zones intertropicales, mais leur importation en Guadeloupe se heurte aux normes françaises et européennes. Les constructeurs de machines agricoles investissent peu sur ces marchés qu'ils trouvent trop étroits. Les tentatives de développement endogène de la mécanisation via « L'Atelier Paysan » sont limitées par leur coût. Lorsque du matériel est disponible, la faible capacité d'investissement des petites exploitations ne leur permet pas de s'équiper de manière autonome. Or, jusqu'à récemment, les porteurs des politiques publiques locales ne souhaitaient plus financer des engins agricoles en Guadeloupe, considérant le niveau de mécanisation de l'île trop élevé. Sachant que cette mécanisation a été orientée vers les grandes cultures (banane exports et canne à sucre) pour la récolte et le transport.

Le développement des ICE butte ainsi sur un « verrouillage sociotechnique », du type de ceux qui ont été décrits par David (1985). Ce concept de verrouillage désigne des situations où une technologie (ici l'absence de valorisation des ICE et la spécialisation des systèmes de production sur la canne et la banane, et est devenue un tel standard pour la société qu'il semble difficile d'en changer, même s'il existe d'autres technologies (ici les techniques valorisant l'ICE) qui répondraient mieux aux attentes sociétales (Cowan et Gunby, 1996 ; Vanloqueren et Baret, 2009 ; Meynard *et al.*, 2018 ; Lamine, 2011 ; Fares *et al.*, 2012). L'identification des leviers pour un « déverrouillage » nécessite de porter l'analyse au niveau du système sociotechnique, c'est-à-dire des relations entre pratiques, savoirs, normes et réseaux d'acteurs.

3.4. Des leviers pour le développement de l'ICE

Compte tenu de la situation complexe et des nombreuses interdépendances identifiées dans cette étude, les stratégies développées jusque-là (apport d'aides financières, de technologies, ou de conseils ...), trop sectorielles (approche filière), ont montré leurs limites. Nous postulons que tout chemin vers le déploiement de pratiques d'ICE reposera nécessairement sur la mobilisation simultanée et organisée de nombreux instruments, à différentes étapes de la chaîne de valeur et impliquant différents acteurs. Nous proposons aux pouvoirs publics de mobiliser simultanément, de manière coordonnée et pérenne différents leviers :

Poursuivre la création d'un référentiel technico-économique. L'évaluation des pratiques et des systèmes agroécologiques est indispensable pour connaître leurs impacts tant du point de vue de la multiperformance et des bouquets de services écosystémiques pour répondre aux enjeux de l'agriculture contemporaine (changement climatique, préservation des ressources, biodiversité, ...) que



du point de vue des systèmes de valeur des acteurs (critères de satisfaction) permettant leur adoption et leur diffusion. Un investissement des organismes de recherche et de développement pour assurer la capitalisation des connaissances et le soutien méthodologique pour l'évaluation est indispensable, permettant de quantifier le coût de la transition, de calibrer les incitations et d'orienter les politiques. Un effort doit porter en particulier sur les marges comparées liées à la réduction des coûts que permettent les pratiques d'ICE via le moindre recours aux intrants.

Favoriser le partage de connaissances entre agriculteurs et les pérenniser. Les échanges entre pairs, tels qu'initiés au sein du mouvement de « campecino a campecino » représentent une alternative au mouvement « top-down » dominant de transfert de technologie. Portées par le RITA, des journées de formation de pair à pair sont organisées régulièrement afin de former les exploitants aux pratiques agroécologiques. Une journée de l'innovation agricole est organisée tous les deux ans à l'initiative du RITA de Guadeloupe. Les projets de recherche portés par les instituts locaux mobilisent de plus en plus les acteurs du territoire pour la co-conception des innovations (Andrieu *et al.*, 2024) ce qui dénote un changement de posture allant dans certains projets jusqu'à de la recherche intervention¹¹. Ce projet a aussi permis la création d'un living-lab Kreyol'Inov¹² dont l'un des objectifs est de servir de support de démonstration et d'évaluation de pratiques innovantes basées sur l'ICE. Ces dispositifs sont souvent adossés à des projets financés sur une durée limitée, réduisant la régularité des actions et donnant l'image d'un fonctionnement par à-coups, qui met en péril la relation de confiance créée avec les acteurs.

Favoriser la coordination entre filières. Des lieux d'échanges entre filières devraient aussi permettre de créer un espace de dialogue entre acteurs de filières différentes d'un même territoire, afin d'explorer collectivement des pistes de coopérations, et d'identifier et lever les freins réglementaires ou organisationnels à ces collaborations. Des projets multi-filières émergents, on peut citer i) pour l'alimentation des animaux avec des ressources locales, un projet de substitution du maïs importé par les écarts de tri de banane produits localement ; ii) un projet d'étude visant à évaluer le potentiel de production d'engrais organiques en Guadeloupe à partir d'intrants locaux, notamment d'origine animale, mobilisant le CTCS, l'IT2 et ITEL, ou encore iii) le projet de plantes de services permettant la gestion des adventices dans les cultures et utilisables en alimentation animale. Ces projets ont mobilisé des financements européens gérés par la Région Guadeloupe. Ils ont démontré la faisabilité technique de ces coopérations mais n'ont pas abordé leur mise en place sur le territoire. De l'innovation organisationnelle pour assurer le lien entre production et collecte des biomasses, couplée à des investissements ciblés sur des infrastructures de stockage et de transformation sont indispensables pour assurer cette mise en place.

Inciter à la sobriété et à la réduction des intrants. Les pratiques d'ICE sont, par définition, des pratiques augmentant l'autonomie et réduisant la dépendance aux intrants des exploitations agricoles via la valorisation des produits et co-produits des cultures et des effluents d'élevage, et/ou des territoires via la valorisation de la diversité des productions et la complémentarité entre cultures et élevage. L'utilisation d'animaux pour la gestion de l'enherbement des cultures permet aussi la réduction du recours aux produits phytosanitaires alors que l'utilisation des plantes pour la gestion de la santé des animaux, permet, quant à elle, la réduction du besoin en produits vétérinaires. L'action publique, surtout celle visant à réduire l'usage d'intrants, pourrait potentiellement favoriser le développement de pratiques d'ICE. Le guichet « réduction des intrants phytopharmaceutiques et des engrais de synthèse » du plan France 2030, financé par FranceAgrimer, avait cet objectif. Mais ce guichet, orienté vers des investissements technologiques pour rendre l'agriculture française « plus moderne et compétitive »

¹¹ <https://agroecodiv-guadeloupe.hub.inrae.fr/rubriques-verticales2/documentation/films/agroecodiv-recherche-intervention>

¹² <https://asset.antilles.hub.inrae.fr/content/download/4742/47159?version=1>



n'était ouvert que sur 20 mois. Meynard *et al.* (2013) soulignent que pour des processus à forte inertie, comme c'est le cas pour le déploiement des pratiques d'ICE, les investissements ne seront suivis d'effets que si les mesures sont mises en œuvre sur la longue durée.

Promouvoir la démarcation des produits. Les signes officiels de qualités permettent de mieux positionner des produits auprès du consommateur final et de stimuler la production par l'aval. A ce jour, hormis la démarcation liée à l'agriculture biologique, il n'existe aucune démarcation autour des pratiques d'ICE sur le territoire. Pour les cultures, les agriculteurs communiquent sur l'absence de fertilisants de synthèse dans leurs productions, remplacés par une fertilisation organique. Ce qui leur assure un écoulement préférentiel de leurs produits, mais ne leur permet pas une augmentation du prix de vente à même de stimuler le déploiement de cette pratique. Pour l'élevage, bien que l'alimentation des animaux avec des ressources locales soit considérée comme un indicateur de qualité des produits. En l'absence d'une démarcation de la qualité et d'une infrastructure dédiée permettant d'assurer la traçabilité (abattoirs, lieux de stockage et de commercialisation), la viande, en particulier pour les gros animaux (bovins, porcins), intègre les circuits classiques de commercialisation qui ne permettent pas d'en accroître la valeur ajoutée. Les pouvoirs publics peuvent favoriser la mise en place de dispositifs, tels que les abattoirs et les boucheries mobiles (permettant le respect de la chaîne du froid) et à même de s'adapter au caractère diffus des exploitations familiales sur le territoire.

4. Conclusions et perspectives

Ces travaux ont mis en évidence la présence d'un système sociotechnique dominant autour de pratiques agricoles et d'élevage conventionnelles, avec une alimentation des animaux dépendante des aliments concentrés importés et une fertilisation avec les engrais minéraux. Les acteurs de ce système partagent des objectifs, une vision, des normes, et des règles. La présence de ce système limite le déploiement de l'ICE malgré son potentiel pour répondre aux enjeux de la transition agroécologique. La méthode présentée ici permet de mobiliser les acteurs des filières et du territoire pour conduire une analyse compréhensive des freins et verrous à l'adoption des pratiques d'ICE. Ce diagnostic a permis l'identification de leviers potentiellement actionnables par les politiques publiques pour participer à lever ces verrous. Cependant, compte tenu des nombreuses interdépendances identifiées dans cette étude, le déploiement de pratiques d'ICE reposera nécessairement sur la mobilisation simultanée, organisée et pérenne de nombreux instruments à différentes étapes de la chaîne de valeur et impliquant différents acteurs. Ce travail participe à la phase de diagnostic pour la co-conception d'un plan d'action pour le déploiement de l'élevage biologique dans les DROM dans le cadre du projet InterDROM SelbioDOM¹³. Il a également été partiellement mis en œuvre sur la Réunion et en Martinique où nous avons vu émerger des freins transversaux aux trois îles et d'autres freins plus spécifiques à chacun des territoires.

Éthique

Sans objet.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les ateliers et les enquêtes ont été réalisés dans le respect du règlement général sur la protection des données (RGPD). Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles à la demande auprès de l'auteur de correspondance sous réserve de conformité au RGPD.

¹³ <https://metabio.hub.inrae.fr/rubriques-verticales/nos-actions/projets-exploratoires/selbiodom-projet-exploratoire-2020-2022>



Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Audrey FANCHONE : <https://orcid.org/0000-0002-9677-6828>

Jean-Philippe CHOISIS : <https://orcid.org/0000-0003-2343-4779>

Jean-Marc MEYNARD : <https://orcid.org/0000-0002-4280-1768>

Contributions des auteurs

Acquisition des fonds (AF, JPC), Administration du projet (AF, JPC), Conceptualisation (AF, JMM, JPC), Enquêtes (AF, DS), Méthodologie (JMM), expertise de terrain (AF, JPC), analyses (AF, DS, JMM, JPC), rédaction – version originale (AF), Rédaction – révision et édition (AF, JMM, JPC).

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les experts ayant contribué à cette étude et l'ensemble des acteurs enquêtés (agriculteurs et acteurs des filières agricoles).

Déclaration de soutien financier

Le projet SelbioDOM a été financé par le métaprogramme INRAE METABIO. Un complément a été apporté par le projet FERDER AgroEcoDiv (subvention FEDER 410-00235 et subvention 410-00232 du Conseil Régional de Guadeloupe).

Références bibliographiques

Altieri M.A., Koohafkan P., 2008. Enduring farms: climate change, smallholders and traditional farming communities (Vol. 6, p. 63). Penang: Third World Network (TWN).

Andrieu N., Dorey E., Lakhia S., Meynard P., Hatil E., Normand L., Gourdine J.-L., Bambou J.-C., 2024. Introducing sheep for agroecological weed management on banana plantations in Guadeloupe: A co-design process with farmers. *Agricultural Systems* 213, 103783. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103783>

Archimède H., Xandé X., Gourdine J. L., Fanchone A., Alexandre G., Boval M., Coppry O., Rémy R., Arquet R.R., Fleury J., Regnier C., Renaudeau, D., 2011. La canne à sucre et ses co-produits dans l'alimentation animale. *Innovations agronomiques*, 16, 165-179.

Aumont G., Caudron I., Xandé A., 1991. Tables des valeurs alimentaires des fourrages tropicaux de la zone Caraïbe et de la Réunion. SRZ, INRA, Guadeloupe.

Bell, L.W., Moore, A.D., 2012. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. *Agricultural Systems* 111, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.04.003>

Biabiany, O., Massardier G., Montouroy Y., 2022. The implementation process of agriculture adaptation instruments to climate change. The invisibilization of European climate policy goals in French West indies' banana Chain. *International Journal of Agricultural Sustainability* 20, 1181–1193. <https://doi.org/10.1080/14735903.2022.2065959>



- 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://www.inrae.fr/actualites/guide-methodologique-diagnostic-sociotechnique>
- CNIL, 2016. Le règlement général sur la protection des données - RGPD. Règlm. Général Sur Prot. Données - RGPD. URL <https://www.cnil.fr/fr/reglement-europeen-protection-donnees>
- Cowan R., Gunby P., 1996. Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies. *Econ J* 106:521–542. <https://doi.org/10.2307/2235561>
- David PA., 1985. Clio and the economics of qwerty. *Am Econ Rev* 75:332–337.
- Dedieu B., 2019. Transversal views on work in agriculture. *Cah. Agric.* 28, 8. <https://doi.org/10.1051/cagri/2019008>.
- Fanchone A, Alexandre G., Chia E., Diman J., Ozier-Lafontaine H., Angeon V., 2020. A typology to understand the diversity of strategies of implementation of agroecological practices in the French West Indies. *European journal of agronomy* 117. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126058>.
- Fanchone A, Alexandre G., Hostiou N., 2022a. 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>
- Fanchone A., Le Merlus E., Alexandre G., Meynard J.M., Fontaine O., Choisis J.P., 2022b. Une traque à l'innovation paysanne pour repérer des systèmes d'élevage autonomes en intrants aux Antilles et à La Réunion3R 2022 - Séance : Mixité dans les systèmes d'élevage, polyculture élevage, exploitation et territoire. <https://journées3r.fr/textes3r/20221606-une-traque-a-linnovation-paysanne-pour-reperer-des-systemes-delevage-autonomes-en-intrants-aux-antilles-et-a-la-reunion/>
- Fanchone A., Nelson L., Dodet N., Martin L., Andrieu N., 2022c. How agro-environmental and climate measures are affecting farming system performances in Guadeloupe? : Lessons for the design of effective climate change policies. *International Journal of Agricultural Sustainability* 20, 1348–1359. <https://doi.org/10.1080/14735903.2022.2136836>.
- Fares M. 2006. Renegotiation design and contract solutions to the hold-up problem. *J Econ Surv* 20:731–756.
- Garrett R.D., Ryschawy J., Bell L.W., Cortner O., Ferreira J., Garik A.V.N., Gil J.D.B., Klerkx L., Moraine M., Peterso, C.A., Dos Reis J.C., Valentim J.F., 2020. Drivers of decoupling and recoupling of crop and livestock systems at farm and territorial scales. *E&S* 25, art24. <https://doi.org/10.5751/ES-11412-250124>.
- Geoffroy F., 1980. Valeur alimentaire et utilisation de la banane par les ruminants en milieu tropical. Thèse de doctorat, Lyon, France.
- Guadeloupe, 2020. Région Guadeloupe. Croissance Verte Agro-écologie, Accélérer la transition agro-écologique en Guadeloupe. https://www.regionguadeloupe.fr/fileadmin/Site_Region_Guadeloupe/Mediatheque/dossier_de_presse/2020-Dossier_Agro_Ecologie.pdf
- Hendrickson J.R., Hanson J.D., Tanaka D.L., Sassenrath G., 2008. Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew. Agric. Food Syst.* 23, 265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>.
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., Bossio D., Dixon J., Peter, M., Van De Steeg J., Lynam J., Rao P.P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Seré C., Rosegrant M., 2010. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems. *Science* 327, 822–825. <https://doi.org/10.1126/science.1183725>.
- Lamine C. 2011. Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM. *J Rural Stud* 27:209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2011.02.001>.
- Marie-Magdeleine C., 2009. Etude de ressources végétales tropicales pour un usage anthelminthique en élevage de ruminants. Thèse de doctorat, Guadeloupe, France.



Meynard J. M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Fares M., Le Bail, M., Magrini M. B., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Étude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Rapport d'étude INRA. 226 p. hal-03231397.

Meynard J.-M., Charrier F., Fares M., Le Bail M., Magrini M.-B., Charlier A., Messéan A., 2018. Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>

Renaudeau D., Brochain J., Giorgi M., Bocage B., Hery M., Crantor E., Marie-Magdeleine C., Archimède H., 2014. Banana meal for feeding pigs: digestive utilization, growth performance and feeding behavior. *Animal* 8, 565–571. <https://doi.org/10.1017/S175173111400010X>.

Russelle M.P., Entz M.H., Franzluebbers A.J., 2007. Reconsidering Integrated Crop–Livestock Systems in North America. *Agronomy Journal* 99, 325–334. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0139>.

Ryschawy J., Choisis N., Choisis J.P., Joannon A., Gibon A., 2012. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? *animal* 6, 1722–1730. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000675>.

Sierra J., Roig N., Martí E., Nadal M., Schuhmacher M., 2011. Amendment of Soils with Composted Sewage Sludge. Long Term Effects on C and N Transformation, in: Trasar-Cepeda C., Hernández T., García C., Rad C., González-Carcedo S. (Eds.), *Soil Enzymology in the Recycling of Organic Wastes and Environmental Restoration, Environmental Science and Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 271–282. https://doi.org/10.1007/978-3-642-21162-1_20.

Stark F., Archimède H., González-García E., Pocard-Chapuis R., Fanchone A., Moulin C.H., 2019. Evaluation des performances agroécologiques des systèmes de polyculture-élevage en milieu tropical humide : application de l'analyse de réseaux écologiques. *Innovations agronomiques* 72, 1-14. <https://doi.org/10.15454/L1W6US>.

Stark F., Fanchone A., Semjen I., Moulin C.-H., Archimède H., 2016. Crop-livestock integration, from single practice to global functioning in the tropics: Case studies in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy* 80, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.004>

Vanloqueren G., Baret P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Res Policy* 38(6):971–983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008>.

Xandé X., Régner C., Archimède H., Bocage B., Noblet J., Renaudeau D., 2010. Nutritional values of sugarcane products in local Caribbean growing pigs. *Animal* 4, 745–754. <https://doi.org/10.1017/S175173110999173X>.

Pour citer cet article : Audrey Fanchone, Damaris Sterling, Jean-Philippe Choisis, Jean-Marc Meynard. Existe-t-il des verrouillages sociotechniques freinant l'intégration culture-élevage ? Un cas d'étude en Guadeloupe. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.94-105. [10.17180/ciag-2025-vol106-art08](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art08)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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

Conception d'un système circulaire de polyculture-élevage agroécologique : la Plateforme agroécologique de Sherbrooke (Québec)

Nicolas DEVILLERS¹, Sabine CONTE¹, Stéphanie DURAND¹, Marie-Noëlle THIVIERGE², Thomas PUECH³, Isabelle BREUNE¹

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Sherbrooke, 2000 rue Collège, Sherbrooke (QC) J1M 0C8, Canada

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec, 2560 boulevard Hochelaga, Québec (QC) G1V 2J3, Canada

³ INRAE, ASTER, 88500 Mirecourt, France

Correspondance : nicolas.devillers@agr.gc.ca

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art09>

Résumé

La place de l'élevage dans les systèmes agroalimentaires occidentaux est fortement questionnée et doit être repensée. Cet article présente la transition d'un système de production laitier et porcin conventionnel vers un système circulaire de polyculture-élevage agroécologique expérimentée sur une ferme de recherche au Québec. Ce système est défini par quatre principes : 1. Réduire la compétition « feed-food » ; 2. Améliorer la circularité des ressources réutilisables et réduire l'utilisation des ressources non renouvelables ; 3. Favoriser la biodiversité au sein de l'agroécosystème et 4. Améliorer sa résilience et sa durabilité. Les approches méthodologiques, les principes de gouvernance et les défis scientifiques, techniques et culturels que ce projet doit relever seront mis en évidence.

Mots-clés : Agroécologie, Conception pas à pas, Expérimentation système, Élevage, Agroforesterie Biodiversité

Abstract: Design of a circular agroecological integrated crop-livestock system: the Sherbrooke agroecological platform (Quebec)

The place of livestock farming in Western agri-food systems is highly questioned and must be rethought. This article presents the transition from a conventional dairy and pork production system to a circular agroecological mixed crop-livestock system tested on a research farm in Quebec. This system is defined by four principles: 1. Reducing feed-food competition; 2. Improving the circularity of reusable resources and reduce the use of non-renewable resources; 3. Promoting biodiversity within the agroecosystem; and 4. Improving its resilience and sustainability. The project's methodological approaches, governance principles and scientific, technical and cultural challenges will be highlighted.

Keywords: Agroecology, Step-by-step design, System experiment, Livestock, Agroforestry, Biodiversity

1. Introduction : D'où nous venons et où nous voulons aller

Depuis la deuxième guerre mondiale, les sciences agronomiques se sont attelées à augmenter la productivité agricole. L'agriculture s'est orientée vers la spécialisation, l'intensification, la mécanisation et l'utilisation de produits chimiques. Au Canada, les animaux autrefois nourris majoritairement à base de plantes fourragères pérennes (ruminants) ou de résidus (monogastriques) ont maintenant une alimentation à base de céréales et de maïs-ensilage, la viande produite étant elle-même destinée en partie à l'exportation. Aujourd'hui, dans les pays occidentaux, 70 à 80 % des protéines végétales comestibles par l'homme sont consommées par les animaux (Cassidy *et al.*, 2013). Or la production de



protéines animales est beaucoup moins efficace que celle de protéines végétales en termes d'utilisation d'azote, d'eau ou de surface agricole (Di Paola *et al.*, 2017 ; Mottet *et al.*, 2017).

Les externalités négatives de cette transformation sont aujourd'hui bien connues et documentées : l'effondrement de la biodiversité par la destruction et le fractionnement des habitats sauvages, la monoculture et l'usage de pesticides (IPBES, 2019) ; la contribution au dérèglement climatique liée à l'augmentation des émissions de gaz à effets de serre par l'utilisation de la fertilisation azotée minérale, le transport des produits agricoles, la déforestation et l'augmentation des cheptels de ruminants (Nabuurs *et al.*, 2022) ; et enfin les risques sanitaires par l'augmentation de la densité des élevages et des risques de zoonoses (Jones *et al.*, 2013) et par l'usage massif d'antibiotiques (Tang *et al.*, 2017).

Au Canada, la superficie agricole totale de 62,2 millions d'hectares se retrouve principalement (82 %) dans les trois provinces des Prairies (Manitoba, Saskatchewan, Alberta ; Statistique Canada, 2022). À l'échelle du pays, 56 % des recettes agricoles canadiennes proviennent des productions végétales contre 38 % des élevages, le reste provenant des paiements gouvernementaux directs aux exploitations agricoles. Au Québec par contre, le ratio est inverse avec 54 % des recettes agricoles correspondant aux productions animales (principalement laitières et porcines) et 37 % aux productions végétales (Statistique Canada, 2024). Si les ventes de céréales et d'oléagineux, principalement du maïs et du soya, correspondent à 17 % des recettes monétaires (MAPAQ, 2024), 80 % des grains produits au Québec sont vendus pour l'alimentation animale. Les élevages sont donc au cœur des revenus agricoles du Québec.

Les filières canadiennes de productions animales sont structurées de manières très différentes. D'un côté, les productions de lait de vache, de volaille et d'œufs sont organisées selon un système de gestion de l'offre (quotas) et ciblent principalement le marché intérieur canadien. De l'autre, les productions de bœufs et de porcs ne bénéficient pas de ce système et sont principalement dédiées à l'exportation (principalement aux États-Unis), ce qui augmente les enjeux en termes de compétition internationale et de contrôle des coûts de production.

La recherche agronomique publique canadienne est financée principalement par le gouvernement fédéral. La plupart des centres de recherche gouvernementaux et privés sont spécialisés par secteur de production et la recherche qui y est effectuée est principalement analytique. Dans les dernières décennies, la majorité des fonds pour la recherche en agriculture ont été dirigés vers des projets d'innovation à court et moyen termes (moins de 5 ans) pour stimuler la croissance économique du secteur agricole (AIC, 2017). Plus récemment, le ministère fédéral de l'agriculture (Agriculture et Agroalimentaire Canada ; AAC) a développé un nouveau plan stratégique avec des missions orientées, entre autres, vers l'adaptation aux changements climatiques, la résilience des agroécosystèmes et l'économie circulaire (AAC, 2022).

Le projet présenté dans cet article s'inscrit dans ce cadre et vise à explorer des alternatives au modèle agricole actuel, particulièrement au regard de la place de l'élevage dans les systèmes agricoles. Il s'appuie sur les principes de l'agroécologie (Wezel *et al.*, 2009), de son application à l'élevage (Dumont *et al.*, 2013) et vise à repenser le rôle de l'élevage, particulièrement au regard de la compétition qu'il exerce actuellement vis-à-vis des denrées alimentaires (Barbieri *et al.*, 2022). Ainsi, en utilisant des ressources alimentaires marginales, et en visant à boucler les cycles des nutriments, cette expérimentation questionnera la place de l'élevage dans les systèmes agricoles (Van Zanten *et al.*, 2019). Ces questions porteront autant sur la nature des élevages que sur les modes de conduite (alimentation, génétique, logement... ; Torpman et Röö, 2024), ceci dans un contexte canadien.

2. Présentation du site de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke

Le projet de Plateforme agroécologique est situé au Centre de Recherche et de Développement de Sherbrooke (CRDS) d'AAC et s'appuie sur une infrastructure située en bordure de la rivière Saint-

François, dans la région de l'Estrie (Sud-Est du Québec), composée de 285 ha cultivés et 60 ha boisés. Les sols proches de la rivière sont issus de dépôts de types lacustres alors que ceux sur les collines sont issus de tills glaciaires, ces derniers étant plus abondants dans cette région. Les cultures (maïs ensilage, prairies temporaires, céréales et soya) servent principalement à alimenter un troupeau de bovins laitiers et à produire de la litière (paille de céréale et d'alpiste roseau). La ferme comprend une étable de 120 vaches et leur relève pour produire un quota de 147 kg de matière grasse par jour. Une porcherie expérimentale héberge 110 truies et leurs porcelets jusqu'au début engraissement pour fournir en animaux les projets expérimentaux. Le site est caractérisé par une saison sans gel d'environ 130 j (mi-mai – début octobre, avec 570 mm de pluie sur cette même période ; Environnement et ressources naturelles Canada, 2024). Les projections climatiques suggèrent un élargissement de cette période (hivers plus tardifs et plus courts) et un allongement de la durée végétative qui pourrait toutefois être marquée par des vagues de chaleur et de sécheresse plus intenses (CDAQ, 2021).

Le site du CRDS est particulièrement bien adapté pour travailler sur des systèmes de polyculture et polyélevage grâce à ses infrastructures et ses compétences pour l'élevage de ruminants et de monogastriques (une vingtaine de chercheurs spécialisés dans des domaines diversifiés en productions laitière et porcine), et également grâce à une diversité des terres en zone vallonnée permettant d'avoir à la fois des sites propices aux cultures annuelles et d'autres mieux valorisés par des systèmes de plantes pérennes. Par ailleurs, une expertise sur les élevages alternatifs, tel le porc au pâturage (Aubé *et al.*, 2021a ; 2021b ; Baert *et al.*, 2022a ; 2022b ; Conrad *et al.*, 2022) ou l'élevage multi-espèces (Genest-Richard *et al.*, 2025a ; 2025b), a été développée dans les dernières années par l'équipe qui coordonne ce projet de Plateforme agroécologique.

Le site choisi pour la Plateforme agroécologique est limité à une petite partie du CRDS pour l'instant car elle coexiste avec le système conventionnel sur lequel la majorité des travaux de recherche du CRDS est réalisée. Le projet de la plateforme a débuté en 2023 avec un bloc de sept parcelles de 2,5 à 6,3 ha, pour une surface totale de 42 ha incluant deux espaces boisés (Figure 1). Parmi ces parcelles, un champ avec un dénivelé important et plus difficile à utiliser pour les cultures annuelles sera converti en pâturage tournant intensif permanent. La proximité du Centre laitier donne aussi la possibilité de faire pâturer les prairies temporaires.



Figure 1 : Carte des parcelles de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke (délimitée en orange) et cultures prévues pour la saison 2025 (Source de l'image satellitaire : Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-



cubed, USDA FSA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community, 2013).

3. Objectifs et principes directeurs de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke

3.1. Objectifs

Ancrée dans la pensée agroécologique, et forte du contexte agricole et scientifique québécois, la Plateforme agroécologique de Sherbrooke se veut une expérience de transition et un site de recherche expérimental sur les systèmes de polyculture et polyélevage agroécologiques. Ce type de recherche systémique est nécessaire pour soutenir la transition des fermes d'élevage vers l'agroécologie (Prost *et al.*, 2023). Elle se place dans la lignée d'autres expérimentations système en élevage réalisées en Europe (Novak *et al.*, 2013 ; Havard *et al.*, 2017 ; Coquil *et al.*, 2019 ; Durant *et al.*, 2020 ; Mertens *et al.*, 2023) et a pour objectifs de tester, à l'échelle de la ferme, des méthodes, des techniques et des pratiques agroécologiques, de générer des connaissances sur les interactions entre les composantes de l'agroécosystème et de partager ces connaissances avec les acteurs du monde agricole pour accompagner la transition agroécologique.

Plus spécifiquement, la plateforme a pour objectifs de :

- concevoir un système de polyculture-élevage, basé sur les principes de l'agroécologie et en rupture avec le modèle agricole conventionnel spécialisé québécois ;
- expérimenter la transition long terme d'un système d'élevage conventionnel vers ce système intégré et circulaire selon une méthode pas à pas (Meynard *et al.*, 2023) ;
- analyser, de manière systémique, les impacts de cette transition sur la durabilité et la résilience du système, notamment en termes de santé des sols, biodiversité, travail et performances techniques des productions végétales et animales (Magne *et al.*, 2024) ;
- mettre en œuvre un processus d'innovation ouverte en stimulant la réflexion et la discussion entre les chercheurs, les agriculteurs et les autres acteurs du milieu sur les systèmes de polyculture-élevage agroécologiques.

3.2. Définition des principes directeurs

Le développement de la plateforme est guidé par quatre principes directeurs, définis à partir d'emprunts à différents cadres conceptuels développés ces dernières décennies [agriculture durable (FAO, 2014), agroécologie (HLPE, 2019), agriculture biologique (IFOAM, 2020) et agriculture régénératrice (Duru *et al.*, 2022)], sans toutefois se restreindre à l'un d'eux. Afin de maintenir de la flexibilité dans le parcours de transition, particulièrement au regard de l'acquisition d'expérience en cours d'expérimentation, et d'adopter une stratégie non linéaire d'essai-erreur (Belmin *et al.*, 2022), les choix de conduites techniques agronomiques (itinéraires techniques) et zootechniques ne sont pas arrêtés ex-ante.

Principe 1. Réduire la compétition « feed-food » et produire efficacement de la nourriture, en particulier des protéines, pour l'alimentation humaine

Ce principe est en lien avec une réévaluation de la place et du rôle des animaux dans le système agricole. L'objectif est de prioriser les cultures destinées à la consommation humaine sur les sols les plus favorables. L'alimentation des animaux s'appuiera sur des résidus de cultures (ex : grains déclassés), des sous-produits agroalimentaires, ou des cultures vivaces sur des terres plus marginales (sol très en pente par exemple) ou dans la rotation. Le cheptel sera dimensionné et adapté (races) en fonction des ressources alimentaires disponibles (quantité et moment) sur la ferme et auprès de partenaires régionaux (sous-produits agroalimentaires). Cette relativisation de l'importance des animaux



implique une adaptation des conduites d'élevage. Ainsi, des pratiques telles que le pâturage, qui ont l'avantage de minimiser les infrastructures, les investissements et les intrants nécessaires, seront envisagées. Ces pratiques offrent d'ailleurs plusieurs avantages du point de vue du bien-être animal mais apportent aussi un certain nombre de défis, comme la gestion de l'exposition des animaux aux aléas météorologiques (Park *et al.*, 2017 ; Aubé *et al.*, 2022). Ce changement dans la place des animaux dans le système entraînera également une transformation du travail des ouvriers agricoles et de leurs compétences.

Principe 2. Améliorer la circularité des flux de ressources réutilisables et réduire l'utilisation des ressources non renouvelables

L'objectif est de réduire le plus possible les intrants, en particulier les intrants non renouvelables (engrais de synthèse et minéraux, énergies fossiles, pesticides), et de rechercher l'efficacité par la circularité des nutriments, la réduction des pertes et les synergies à l'intérieur du système (HLPE, 2019). Par exemple, au niveau de la gestion de l'azote, cela consiste à favoriser la fixation symbiotique de l'azote et l'utilisation d'engrais d'origine organique produit au sein du système. Au niveau du carbone, le système sera conçu pour qu'il concentre plus d'énergie qu'il n'en dissipe en maximisant le potentiel de la photosynthèse, par exemple avec l'agroforesterie ou les cultures associées. Si le couplage entre culture et élevage est une des voies pour augmenter l'efficacité du système (Durant *et al.*, 2020), nous n'avons pas pour objectif d'atteindre une autonomie totale. Ainsi, l'utilisation d'intrants, comme les résidus agroalimentaires pour nourrir les animaux en lien avec le premier principe, est une façon de réintroduire des nutriments dans le système pour compenser les sorties et améliorer la circularité à l'échelle de la région de Sherbrooke.

Principe 3. Favoriser et gérer la biodiversité en misant sur les synergies au sein de l'agroécosystème

Ce principe a pour objectif de favoriser la diversité des espèces sauvages mais aussi domestiques, tout en gérant les espèces envahissantes et les ravageurs. Pour cela, il est important de partager les espaces avec les espèces sauvages, mais également de favoriser les synergies, par exemple en aménageant des habitats favorables aux espèces pollinisatrices ou aux prédateurs des ravageurs. L'agroforesterie, mais aussi la diversification des variétés végétales cultivées ainsi que des races animales élevées, feront partie des stratégies utilisées pour réintroduire de la diversité dans la composition et la configuration des habitats présents dans l'agroécosystème (Duru *et al.*, 2015).

Principe 4. Améliorer la résilience et la durabilité de l'agroécosystème

Ce principe articule deux concepts, la résilience et la durabilité, dont la relation est discutée dans la littérature scientifique (Roostaie *et al.*, 2019 ; Popescu *et al.*, 2023). La résilience peut être définie comme la capacité de l'agroécosystème à maintenir ses fonctions, comme de produire des aliments pour les humains, des matériaux ou de l'énergie, en dépit de perturbations qui peuvent être de différentes natures (environnementales, économiques, sociales ou institutionnelles ; Meuwissen *et al.*, 2019). La résilience passe par la diversification à tous les niveaux. L'agrobiodiversité, en particulier la diversification génotypique, phénotypique et spécifique des plantes cultivées et animaux élevés (Magne *et al.*, 2019), en fait partie, mais aussi la diversification des types de production, et donc des produits, des revenus et des débouchés (Dumont *et al.*, 2022). Là encore, l'agroforesterie est une composante de la diversification des types de productions (bois, fruits, fourrages). D'autres capacités du système, telles que la capacité tampon, via la production de surplus, le stockage, ainsi que la redondance, ou la connectivité sont autant de manières d'en augmenter les facultés d'adaptation et de transformation (Biggs *et al.*, 2012). La durabilité considère la capacité de l'agroécosystème à répondre aux besoins actuels sans compromettre celle à répondre aux besoins futurs. Les notions de sécurité alimentaire et de préservation des ressources, entre autres, y sont étroitement associées (Popescu *et al.*, 2023) et sont au cœur des trois premiers principes directeurs de la Plateforme agroécologique. La détermination



et le suivi d'indicateurs de durabilité et de résilience du système seront nécessaires pour pouvoir observer leur évolution au cours de la transition (Röös *et al.*, 2021).

4. Conception du système de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke

4.1. Approches méthodologiques

D'un point de vue méthodologique, différentes approches complémentaires sont nécessaires à la conception, au pilotage et à l'analyse du système. Nous proposons de suivre le modèle de la conception pas à pas telle que définie par Meynard *et al.* (2023), notamment au travers d'une succession de cycles de diagnostic, exploration, mise en œuvre et évaluation (Figure 2).

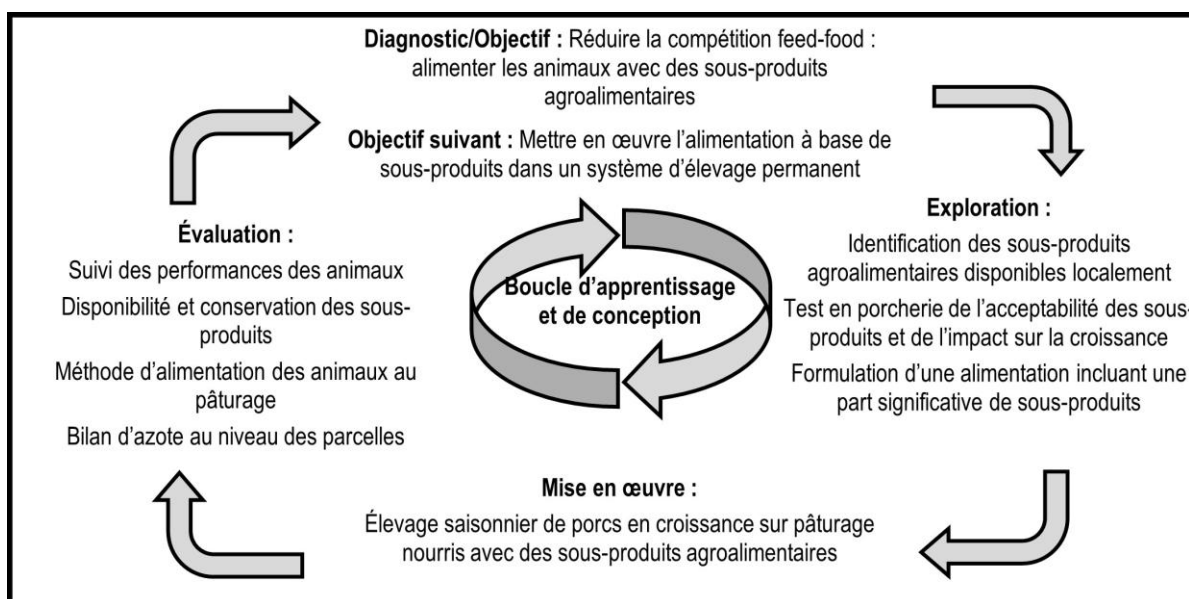


Figure 2 : Exemple d'une boucle d'apprentissage au cours du processus de conception pas à pas en lien avec la compétition feed-food (adapté de Meynard *et al.* 2023)

Comme le système à concevoir correspond à une transformation du système existant, soit une production végétale conventionnelle (utilisant des engrais synthétiques, des cultures génétiquement modifiées et des herbicides) nourrissant essentiellement un troupeau laitier, une phase de transition est nécessaire et doit s'envisager sur le temps long. Une période de dix ans est prévue pour effectuer cette transition initiale et mettre en place progressivement les pratiques culturales, d'élevage et de gestion de l'eau, des nutriments, de l'énergie et de la biodiversité qui auront été identifiées en lien avec les quatre principes directeurs (phases d'exploration). En phases d'exploration, la réalisation d'expérimentations analytiques (sur le site de la plateforme ou en dehors) peut aussi être utile pour explorer certaines pratiques avant d'éventuellement les adopter à l'échelle du système.

La définition d'indicateurs de suivis des performances sera nécessaire pour évaluer le système et guider son pilotage (Prost *et al.*, 2018 ; Quinio *et al.*, 2022). Le défi sera de sélectionner les indicateurs les plus pertinents parmi la multitude d'indicateurs système existants (Soulé *et al.*, 2021 ; Magne *et al.*, 2024). Toutefois, une place importante sera donnée aux indicateurs permettant d'évaluer les interactions entre les composantes du système (Drinkwater *et al.*, 2016). Cela impose de collecter un large éventail de données permettant de documenter les flux et les interactions physiques, biologiques, agronomiques, sociales et économiques à différents niveaux (nutriments, eau, énergie, travail, espèces, protéines, revenus...) et pour différentes composantes du système (sols/parcelles, cultures, animaux, habitats, flore et faune sauvages, infrastructures...).



Ce type d'expérience de transition vers des systèmes agroécologiques est important pour stimuler la créativité et montrer l'étendue des possibles (Prost *et al.*, 2023). C'est pourquoi il est nécessaire de documenter ce processus de transition, notamment les raisons des choix techniques, et de l'ancrer dans une démarche d'innovation ouverte.

4.2. Gouvernance et innovation ouverte

La gestion de la plateforme agroécologique repose sur une gouvernance intégrée dans une démarche d'innovation ouverte. La démarche engagée amène les chercheurs à travailler en étroite collaboration avec les acteurs du territoire : elle repose sur une hybridation des savoirs entre scientifiques, agriculteurs et conseillers agricoles pour concevoir et piloter pas à pas l'expérimentation (Belmin *et al.*, 2022). La gouvernance de la plateforme est composée de deux niveaux qui diffèrent par les personnes impliquées, la fréquence des rencontres et les sujets traités.

Au premier niveau, un comité stratégique, composé d'éleveurs, de cultivateurs, de conseillers agricoles et de chercheurs, se réunit deux fois par an. Le comité fournit des recommandations et des orientations sur la planification des prochaines étapes de la transition du système (par exemple, choix des assolements et implantations d'agroforesterie) ou sur les essais analytiques proposés par les scientifiques. Ce comité est également consulté sur les stratégies de financement ou de valorisation.

Le deuxième niveau de gouvernance correspond à l'équipe de coordination de la plateforme, composée d'un chercheur, deux agronomes et une assistante de recherche, qui se rencontrent sur une base hebdomadaire. Cette équipe coordonne les travaux effectués en lien avec les équipes techniques et les équipes de recherche intervenant sur la plateforme. La coordination avec des équipes de recherche relève d'un enjeu fort pour la construction de l'interdisciplinarité sur la plateforme [agronomie, agroforesterie, physiologie des plantes, microbiologie (sols, plantes et animaux), pédologie, écologie intégrative, entomologie, agroécologie, éthologie, immunologie, nutrition des animaux, modélisation et bio-informatique]. L'équipe de coordination travaille également avec la direction du CRDS pour articuler les activités de la plateforme agroécologique avec les autres activités expérimentales du centre de Sherbrooke et gérer les ressources matérielles, humaines et financières nécessaires au fonctionnement de l'expérimentation.

En complément de cette gouvernance, un atelier est organisé chaque année pour (i) présenter l'avancement du projet, (ii) favoriser le partage d'expériences entre acteurs engagés dans la transition agroécologique au Québec et (iii) éventuellement intensifier les collaborations avec certains acteurs professionnels (participation au comité stratégique, conseils techniques). Le premier atelier (février 2024) a réuni une trentaine de personnes : un tiers d'agriculteurs, un tiers de conseillers et un tiers de chercheurs. Il a permis d'une part de proposer des pratiques d'intérêt particulier à mettre en œuvre sur le site au niveau des cultures (ex : culture du soya sur seigle roulé, orge d'automne) et de l'agroforesterie, de suggérer des axes de recherche et développement (ex : alimentation alternative des porcs) mais aussi de souligner les défis qui devront être relevés. Un deuxième atelier (mars 2025) a eu pour but de déterminer des indicateurs de suivi de la plateforme pour guider les décisions, suivre l'évolution de l'agroécosystème et les impacts des transformations mises en place.

5. La transition vers un système agroécologique

5.1. Définition du système

La transition du système a démarré en 2023 et est prévue sur une dizaine d'années. Cette durée permet de prendre le temps de mettre en place des nouvelles pratiques aux niveaux des cultures, des élevages et de la gestion du territoire, tout en considérant les ressources matérielles, humaines et financières disponibles. Cette période permettra également de répéter plusieurs cycles de diagnostic,

exploration, mise en œuvre et évaluation, tel que décrit par Meynard *et al.* (2023), incluant notamment des essais analytiques.

Le système est organisé en lien avec les quatre principes directeurs tout en considérant la superficie et le nombre de parcelles disponibles. Il est schématisé à la figure 3 et comprend :

- une rotation des cultures sur 6 ans incluant trois années de prairies temporaires, une culture de tête exigeante en azote (ex : maïs ou pommes de terre), une culture de légumineuse (ex : soya), une culture céréalière (ex : blé) et incluant des cultures d'automne (ex : seigle, orge) ou de couverture pour limiter l'utilisation de la fertilisation minérale, le travail du sol et l'érosion ;
- l'élevage de ruminants et de porcs pour valoriser les prairies temporaires et permanentes ainsi que les résidus de cultures et des sous-produits agroalimentaires locaux, participer au bouclage des cycles de nutriments via la fertilisation organique et aider à travailler le sol à la fin du cycle de prairie ;
- une intégration de l'agroforesterie dans les parcelles et la prairie permanente pour limiter l'érosion, permettre l'infiltration de l'eau, fournir des habitats à la faune sauvage, de l'ombre aux animaux domestiques et des ressources (ex : bois, petits fruits, fourrages) ;
- une place centrale pour la biodiversité pour renforcer les services écosystémiques, en particulier de régulation (ex : contrôle des ravageurs, prédation, pollinisation) et de support (ex : cycle des nutriments, habitats, pédogenèse, photosynthèse).

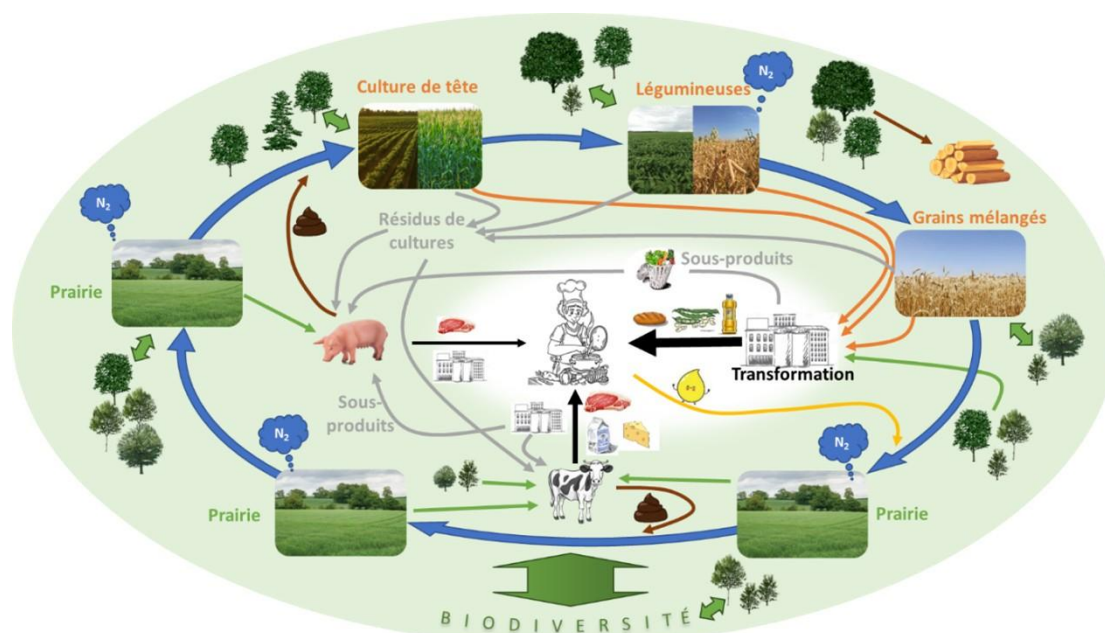


Figure 3 : Schématisation du système de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke montrant la rotation de cultures sur 6 ans, les flux entre les productions végétales, animales et les humains, ainsi que les liens avec l'agroforesterie et la biodiversité. Au centre sur fond blanc, les liens avec le système agroalimentaire externe à la plateforme.

5.2. Suivi du système

L'évaluation du système pourra s'appuyer sur les équipes de recherche (équipements et compétences) du CRDS (spécialisé en sciences animales) et du CRD de Québec (spécialisé en sciences végétales et du sol). Les données seront collectées avec une haute résolution spatiale et temporelle. Au lancement de la plateforme (2023-2024), un état initial a été réalisé en termes de santé des sols (physico-chimie, microbiologie, hydrologie) et de biodiversité (inventaires des oiseaux, grands mammifères, chauve-



souris, couleuvres, insectes, arbres et plantes herbacées ; configuration des habitats). Cette évaluation du système est prévue d'être répétée tous les 5 ans. En parallèle, toutes les données concernant le suivi agronomique des parcelles (travail du sol, fertilisation, rendements...) et la conduite des animaux (alimentation, croissance...) seront mesurées annuellement en plus des données complémentaires issues des essais plus ponctuels. Les données collectées seront pour la plupart géoréférencées et seront organisées et stockées dans une base de données relationnelle qui permettra par la suite le calcul d'indicateurs de suivi du système, ainsi qu'une analyse spatiale des interactions entre les composantes de l'agroécosystème. En particulier, le choix d'indicateurs de biodiversité adaptés au milieu agricole fait l'objet d'un projet dédié. En effet, si au Québec l'étude de la biodiversité dans les milieux naturels est bien développée, les milieux agricoles ne sont pas inclus dans ce suivi et leur surveillance se limite en général aux aspects phytosanitaires et aux ravageurs. Un projet sur le suivi des insectes du sol en milieu agricole a donc été débuté en collaboration avec des partenaires universitaires et le ministère de l'environnement du Québec.

5.3. Les phases de transition

D'un point de vue pratique, la période de transition a été prévue en trois phases, d'environ trois ans chacune, qui permettront la transformation progressive de l'agroécosystème.

La première phase a débuté avec le changement des pratiques et rotations de cultures. Ainsi, en accord avec les principes directeurs, les types de cultures ont été changés pour des cultures à destination de la consommation humaine directe (ex : orge brassicole) avec la mise en place de techniques culturales innovantes au Québec (ex : soya sur seigle roulé). Les arbres sont également des éléments clés dans le nouvel agroécosystème. Ils sont intégrés progressivement avec des dispositifs agroforestiers implantés dans trois parcelles (Figure 1).

La deuxième phase de la transition aura pour objectif d'intégrer les animaux à partir de 2027, sur une base saisonnière dans un premier temps, afin de développer les savoir-faire, apprendre à dimensionner le cheptel aux ressources, déterminer la conduite des animaux et acquérir les équipements et infrastructures. En particulier, il sera nécessaire de définir leurs sources d'alimentation, en intégrant notamment un pâturage tournant dynamique, et d'identifier les races les mieux adaptées. Dans le cas des porcs, la valeur nutritionnelle de sous-produits agroalimentaires disponibles localement (ex : drêches de microbrasserie, Okara, pulpe de pommes, radicales d'orge germée...) devra être évaluée pour pouvoir réduire l'utilisation d'aliments concentrés à base de maïs et de soya.

La dernière phase sera une phase de consolidation avec l'intégration de l'élevage de manière permanente ainsi que la formalisation des partenariats au niveau local pour la fourniture des intrants et la valorisation des produits. Une fois la transition achevée et le système complètement fonctionnel, la plateforme sera un outil de travail de recherche expérimentale sur les systèmes de polyculture-élevage agroécologiques. Le suivi à long terme de l'agroécosystème se continuera et la plateforme évoluera en fonction des besoins des agriculteurs et des enjeux auxquels fera face l'agriculture.

6. Les défis de la Plateforme agroécologique de Sherbrooke

Dans cette dernière partie, nous soulignerons comment la Plateforme agroécologique pourra être un outil original et innovant de recherche en agriculture au Canada, mais aussi quels sont ses limites et les enjeux auxquels le collectif qui la développe aura à faire face.

6.1. Oser repenser la place des animaux dans le système agricole

Proposer un projet de recherche systémique dont le premier principe est de réduire la compétition feed-food, présente un défi de taille, au niveau technique et scientifique. De plus, dans une province où l'économie agricole repose en grande partie sur l'élevage, les défis sont aussi culturels et sociétaux.



Dans une perspective agroécologique, cela implique en effet à la fois une désintensification de l'élevage et une réduction de la place des produits animaux dans l'alimentation. La place des animaux devient secondaire et conditionnelle à la capacité de les nourrir avec des résidus de la ferme ou importés et avec les superficies non destinées aux cultures pour la consommation humaine (terres marginales et prairies en rotation). Parmi les scénarios possibles de la place des animaux dans le futur, notre projet se place donc clairement dans une stratégie dite « ecological leftovers » qui n'est réaliste qu'avec une diminution de la part des produits animaux dans la diète occidentale (Röös *et al.*, 2017). Cette vision de l'élevage ne fait pas consensus et vient heurter d'autres récits sur l'avenir de l'agriculture et de l'élevage axés soit sur la production de protéines animales au meilleur coût économique possible, soit sur une disparition de l'élevage comme au sein des courants de type *vegan* ou prônant la production de protéines animales en laboratoire (Röös *et al.*, 2017).

Repenser la place des animaux demande de nombreux ajustements dans la façon de concevoir l'élevage. Comment gérer une production qui doit être flexible, s'ajuster aux ressources disponibles et donc pouvoir varier dans le temps tout en prenant en considération le bien-être des animaux et celui des humains ? Quelles sont les races d'animaux adaptées à des conditions variables d'élevage et d'alimentation, ainsi que les conduites et infrastructures d'élevage à la fois flexibles, modulables et peu coûteuses qui permettront de garder un rapport coût/revenu acceptable ? Comment optimiser les autres rôles bénéfiques pour l'agroécosystème que peuvent remplir les animaux d'élevage tels que la production de fertilisants, l'entretien des paysages, le travail des parcelles, la valorisation des fibres végétales et le recyclage des matières organiques ? Quels changements cette transformation implique au niveau du travail de l'éleveur ? Il s'agit donc de proposer une transformation en profondeur de l'élevage tel que présent au Canada. C'est pourquoi elle ne peut être pensée que sur le temps long, et mise en place que de manière graduelle. Ce projet est donc clairement axé sur une vision de l'avenir qui prend en compte à la fois les bouleversements climatiques, l'effondrement de la biodiversité et la réduction de l'utilisation des énergies fossiles comme facteurs fondamentaux qui, nous le pensons, vont contribuer à une nécessaire sobriété des systèmes agroalimentaires.

6.2. Travailler à l'échelle du système de manière holistique

Si l'approche systémique au niveau expérimental n'est pas nouvelle en science, elle est moins utilisée que l'approche analytique et aussi moins mise en œuvre au niveau de la recherche agricole au Canada. L'approche systémique est le plus souvent associée à la modélisation et à la représentation schématique sous forme de stocks et de flux. Elle permet de décrire les interactions entre les différentes composantes du système, par exemple sous forme de bilans. Aussi, bien que l'approche système soit globale, elle peut se restreindre à considérer seulement certains types de flux (ex : bilan d'azote, bilan carbone, cycle de l'eau). Un défi de notre projet est de mettre en œuvre à la fois cette approche classique mesurant certains flux élémentaires pertinents à l'agroécosystème (ex : azote/protéines, carbone, phosphore, énergie) et également d'introduire dans l'analyse des éléments plus complexes tel que la biodiversité incluant le microbiome. L'objectif est d'associer l'approche holistique de l'agroécologie avec une démarche scientifique permettant d'analyser le fonctionnement et l'évolution de l'agroécosystème.

En pratique, cette approche présente plusieurs défis. Un projet de cette envergure est d'abord un défi humain. Il nécessite un travail scientifique véritablement collaboratif qui décloisonne les disciplines et met réellement en œuvre une approche systémique holistique. Cela nécessite une certaine prise de risque, de la part de tous les collaborateurs, pour sortir de leur zone de confort et d'expertise, pour échanger sur des sujets parfois moins maîtrisés, pour amorcer des collaborations interdisciplinaires, afin de créer une synergie entre les équipes de recherche et les partenaires extérieurs et ainsi valoriser au mieux les données collectées. Au niveau interne, dans un centre de recherche conventionnel où l'augmentation de la productivité des animaux a été l'objectif principal de la recherche pendant des



décennies, la mise en place d'un dispositif de recherche dont les objectifs peuvent entrer en compétition voire en contradiction avec les logiques de recherche ou de travail existantes nécessite un travail d'explication et de dialogue avec l'ensemble de la communauté scientifique et technique, pour les inviter à comprendre, voire à contribuer au projet (Fiorelli *et al.*, 2014).

Un tel projet ne peut se réaliser qu'au travers d'une collecte de données sur le long terme pour offrir une capacité d'analyse pluriannuelle permettant de dépasser la variabilité saisonnière. D'un point de vue opérationnel, la planification et le financement d'une recherche à long terme peut être particulièrement difficile car elle se heurte aux changements des priorités de recherche et des possibilités de financements liés à des considérations politiques, elles-mêmes soumises aux échéances électorales. Ainsi, en l'absence de financements de recherche spécifiques, a minima, les rotations de cultures et le suivi agronomique de la plateforme agroécologique seront maintenus et les plantations d'arbres entretenues. La fréquence des mesures (indicateurs de santé des sols, biodiversité...) et la vitesse de mise en place de l'élevage au sein du système sera adaptée. La plateforme sera évaluée à partir de ses productions scientifiques et du transfert des connaissances. Or, les processus étudiés sont des processus de long terme pouvant entraîner un décalage entre le lancement de l'expérimentation et la valorisation scientifique. La sécurisation de la plateforme et de ses financements passera donc aussi par la valorisation, sur le court terme, d'essais techniques et d'expériences analytiques nichées dans l'expérimentation système sans pour autant perdre de vue la trajectoire à long terme.

6.3. Co-construire des résultats dans un contexte d'innovation ouverte

L'ambition de la plateforme est de s'inscrire dans une dynamique d'innovation ouverte, en lien étroit avec le personnel technique œuvrant sur la station de recherche ainsi que des acteurs engagés dans la transition agroécologique. Ces personnes sont impliquées activement dans les processus de décision conduisant aux choix des cultures, des expérimentations et aux adaptations du système. Le personnel technique est peu habitué à être partie prenante des décisions scientifiques et techniques. De plus, les objectifs de la plateforme et les moyens mis en œuvre imposent de rompre avec un certain nombre de pratiques parfois bien ancrées dans les habitudes de travail (ex. : utilisation d'engrais minéraux ou de pesticides, travail du sol, maintien des animaux à l'intérieur...) et de se former à de nouvelles façons de faire. Le développement de compétences dans la communication, l'accompagnement au changement, les capacités d'écoute et d'empathie ou les outils facilitant la collaboration fait donc autant partie du processus de transition que l'acquisition de nouvelles connaissances et compétences techniques au niveau agricole.

Les résultats et connaissances techniques attendus du projet sont très divers tant par leur nature que par leur portée. Il faudra en particulier porter attention à produire des connaissances utilisables par les agriculteurs (Toffolini, 2016). La production mais aussi le transfert et la diffusion des résultats nécessitent donc de collaborer étroitement avec les agriculteurs et les conseillers agricoles. Voici quelques exemples de résultats attendus :

Réintroduire de la diversité dans la gestion des terres, des cultures et des élevages

Tel que mentionné précédemment, la diversité est un objectif clé de ce projet. Aussi, il est important de bien documenter ce qu'implique ce modèle de production diversifié en termes de travail, de connaissances, de développement de compétences et de capacité de travail en équipe. La spécialisation a plusieurs avantages pour les entreprises agricoles. Elle permet aux responsables d'acquérir des compétences techniques précises, d'utiliser les infrastructures et les équipements à leur plein potentiel et d'obtenir potentiellement plus de résultats avec les mêmes investissements. Si notre plateforme intègre cette diversité dans son ensemble, il est important de bien comprendre ce que signifiera gérer cette diversité sur des entreprises agricoles. A quelle échelle pourra-t-elle effectivement



se déployer : la ferme, la municipalité, le bassin versant ? Nous n'envisageons pas qu'un individu seul puisse gérer de manière efficace et sans s'épuiser le modèle de polyculture-élevage que nous mettons en œuvre sur cette plateforme. L'expérience pratique des agriculteurs partenaires au projet sera d'une grande utilité pour ces aspects.

Utiliser des indicateurs systémiques clés pour prendre des décisions éclairées

Un des résultats attendus des travaux sur cette plateforme est d'enrichir les connaissances existantes sur des indicateurs de durabilité et de résilience et de permettre leur intégration dans la gestion des entreprises au même titre que les indicateurs économiques. Ainsi la comptabilisation du travail et des ressources nécessaires à la protection des habitats naturels, au recyclage des nutriments et autres activités qui actuellement ne sont pas identifiées dans les systèmes comptables seront mesurées. A cet effet, notre regard se porte vers l'utilisation des principes de comptabilité écologique ou socio-environnementale tels que ceux développés par le cercle français des comptables environnementaux et sociaux, notamment le modèle CARE (Comprehensive Accounting in Respect of Ecology), proposé à l'échelle des entreprises agricoles (Feger *et al.*, 2022).

7. Conclusion

Le projet de Plateforme agroécologique de Sherbrooke est à la fois un outil de recherche transdisciplinaire, une expérimentation système permettant d'appréhender différemment l'agroécosystème dans sa complexité et un processus de transition vers un système en rupture avec le modèle conventionnel. Il implique plusieurs acteurs innovants du secteur agricole québécois. Un tel projet s'accompagne d'une prise de risque aux niveaux technique par l'ampleur et la diversité des changements appliqués au système agricole, et scientifique par la prise de distance avec l'approche analytique et la nécessité pour les chercheurs de dépasser les frontières de leurs expertises disciplinaires. Il présente aussi des défis organisationnels avec la nécessité de faire évoluer les compétences techniques des personnes impliquées, et financiers pour maintenir ce dispositif sur le long terme. Cependant, nous croyons fortement que la plateforme est un outil à la hauteur des enjeux auxquels fait face l'agriculture. Elle permettra d'ouvrir des perspectives vers d'autres modèles agricoles. C'est également pour toutes ces raisons qu'elle ne peut exister que dans un cadre de recherche sur le long terme au service du bien public.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCID des auteurs

Nicolas DEVILLERS : <https://orcid.org/0000-0002-5866-9394>

Marie-Noëlle THIVIERGE : <https://orcid.org/0000-0003-0246-2746>



Thomas PUECH : <https://orcid.org/0000-0003-2192-9719>

Isabelle BREUNE : <https://orcid.org/0009-0000-5712-8564>

Contributions des auteurs

Conceptualisation : ND, IB ; Acquisition de financements : NB, IB ; Administration du projet : ND, IB ; Présentation visuelle : ND, IB ; Rédaction - ébauche du manuscrit initial : ND, IB ; Rédaction - relectures et corrections : ND, SC, SD, MNT, TP, IB

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du comité stratégique de la Plateforme agroécologique et le personnel du Centre de recherche et de développement de Sherbrooke pour leur contribution au travail de réflexion et à la mise en place de la Plateforme agroécologique.

Déclaration de soutien financier

Ce travail est financé par Agriculture et Agroalimentaire Canada (projet n° J-003114).

Références bibliographiques

- AAC, 2022. Plan stratégique pour la science d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, ON. Document No A59-91/2022F-PDF.
- AIC, 2017. An Overview of the Canadian Agricultural Innovation System. Agricultural Institute of Canada, Ottawa, ON.
- Aubé L., Guay F., Bergeron R., *et al.*, 2021a. Feed restriction and type of forage influence performance and behaviour of outdoor gestating sows. *Animal* 15, 100346.
- Aubé L., Guay F., Bergeron R., *et al.*, 2021b. Foraging behaviour of gestating sows on pasture and damages to vegetation cover are influenced by restriction of concentrate feed. *Applied Animal Behaviour Science* 237, 105299.
- Aubé L., Mialon M.M., Mollaret E., *et al.*, 2022. Review: Assessment of dairy cow welfare at pasture: measures available, gaps to address, and pathways to development of ad-hoc protocols. *Animal* 16, 100597.
- Baert S., Aubé L., Haley D.B., *et al.*, 2022a. The protective role of wallowing against heat stress in gestating and lactating sows housed outdoors. *Physiology & Behavior* 254, 113898.
- Baert S., Aubé L., Haley D.B., *et al.*, 2022b. To wallow or nurse: Sows housed outdoors have distinctive approaches to thermoregulation in gestation and lactation. *Applied Animal Behaviour Science* 248, 105575.
- Barbieri P., Dumont B., Benoit M., Nesme T., 2022. Opinion paper: Livestock is at the heart of interacting levers to reduce feed-food competition in agroecological food systems. *Animal* 16, 100436.
- Belmin R., Malézieux E., Basset-Mens C., *et al.*, 2022. Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework. *Agronomy for Sustainable Development* 42, 3.
- Biggs R., Schlüter M., Biggs D., *et al.*, 2012. Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annual Review of Environment and Resources* 37, 421-448.
- Cassidy E.S., West P.C., Gerber J.S., Foley J.A., 2013. Redefining agricultural yields: from tonnes to people nourished per hectare. *Environmental Research Letters* 8, 034015.



- CDAQ, 2021. Plan d'adaptation de l'agriculture de l'Estrie aux changements climatiques. Projet Agriclimat. Centre pour le développement de l'agriculture du Québec, Longueuil, QC.
- Conrad L., Aubé L., Heuchan E., *et al.*, 2022. Effects of farrowing hut design on maternal and thermoregulatory behaviour in outdoor housed sows and piglets. *Applied Animal Behaviour Science* 251, 105616.
- Coquil X., Anglade J., Barataud F., *et al.*, 2019. TEASER-lab : concevoir un territoire pour une alimentation saine, localisée et créatrice d'emplois à partir de la polyculture - polyélevage autonome et économe. La diversification des productions sur le dispositif expérimental ASTER-Mirecourt. *Innovations Agronomiques* 72, 61-75.
- Di Paola A., Rulli M.C., Santini M., 2017. Human food vs. animal feed debate. A thorough analysis of environmental footprints. *Land Use Policy* 67, 652-659.
- Drinkwater L.E., Friedman D., Buck L., 2016. Systems Research for Agriculture. Innovative Solutions to Complex Challenges. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE), Brentwood, MD.
- Dumont B., Fortun-Lamothe L., Jouven M., *et al.*, 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal* 7, 1028-1043.
- Dumont B., Franca A., López-i-Gelats F., *et al.*, 2022. Diversification increases the resilience of European grassland-based systems but is not a one-size-fits-all strategy. *Grass and Forage Science* 77, 247-256.
- Durant D., Martel G., Chataigner C., *et al.*, 2020. Comment évoluer vers davantage d'autonomie au sein des systèmes de polyculture-élevage ? : l'expérience d'une ferme expérimentale en marais. *Fourrages* 241, 21-34.
- Duru M., Sarthou J.P., Therond O., 2022. Regenerative agriculture: Pinnacle of agroecology or greenwashing? *Cahiers Agricultures* 31, 17.
- Duru M., Therond O., Martin G., *et al.*, 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1259-1281.
- Environnement et ressources naturelles Canada, 2024. Données des normales climatiques canadiennes pour 1991-2020. https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/index_f.html (données mises à jour le 01/10/2024).
- FAO, 2014. Building a common vision for sustainable food and agriculture. Principles and approaches. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Feger C, Levrel H, Rambaud A. 2022. Trois méthodes comptables complémentaires pour mettre les problèmes écologiques au coeur de la chose publique. *Revue française d'administration publique* no 183, 2022, p. 815-830.
- Fiorelli C., Auricoste C., Meynard J.M., 2014. Concevoir des systèmes de production agroécologiques dans les stations expérimentales de l'INRA: d'importants changements de référentiel professionnel pour les agents et les collectifs de recherche. *Courrier de l'environnement de l'INRA* 64, 57-68.
- Genest-Richard P., Halde C., Breune I., *et al.*, 2025a. Multivariate analysis of economic performance and environmental impacts of multispecies pastured livestock farms using direct marketing. *Agricultural Systems*, in press.
- Genest-Richard P., Halde C., Mundler P., Devillers N., 2025b. A Promising Niche: Current State of Knowledge on the Agroecological Contribution of Alternative Livestock Farming Practices. *Agriculture* 15, 235.
- Havard M., Alaphilippe A., Deytieu V., *et al.*, 2017. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation « système » pour les cultures assolées et pérennes. GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique.
- HLPE, 2019. Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome, Italy.
- IFOAM, 2020. Principles of organic agriculture. International Federation of Organic Agriculture Movements, Bonn, Germany.
- IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES, Bonn, Germany.



- Jones B.A., Grace D., Kock R., *et al.*, 2013. Zoonosis emergence linked to agricultural intensification and environmental change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 8399-8404.
- Magne M.-A., Alaphilippe A., Bérard A., *et al.*, 2024. Applying assessment methods to diversified farming systems: Simple adjustment or complete overhaul? *Agricultural Systems* 217, 103945.
- Magne M.A., Nozières-Petit M.O., Courmut S., *et al.*, 2019. Gérer la diversité animale dans les systèmes d'élevage : laquelle, comment et pour quels bénéfices ? *INRA Productions Animales* 32, 263-280.
- MAPAQ, 2024. Profil régional de l'industrie bioalimentaire au Québec, estimations pour l'année 2023. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, QC.
- Mertens A., Kokemohr L., Braun E., *et al.*, 2023. Exploring Rotational Grazing and Crossbreeding as Options for Beef Production to Reduce GHG Emissions and Feed-Food Competition through Farm-Level Bio-Economic Modeling. *Animals* 13, 1020.
- Meuwissen M.P.M., Feindt P.H., Spiegel A., *et al.* 2019. A framework to assess the resilience of farming systems. *Agricultural Systems* 176, 102656
- Meynard J.M., Cerf M., Coquil X., *et al.*, 2023. Unravelling the step-by-step process for farming system design to support agroecological transition. *European Journal of Agronomy* 150, 126948.
- Mottet A., de Haan C., Falcucci A., *et al.*, 2017. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security* 14, 1-8.
- Nabuurs G.-J., Mrabet R., Abu Hatab A., *et al.*, 2022. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In: P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, pp. 747-860. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.
- Novak S., Delagarde R., Fiorelli J.L., 2013. Conception d'un système fourrager bioclimatique : la démarche initiée à Lusignan. *Fourrages* 215, 241-246.
- Park H.S., Min B., Oh S.H., 2017. Research trends in outdoor pig production - A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 30, 1207-1214.
- Popescu G.C., Popescu M., Pampana S., *et al.* 2023. Introduction: Sustainability as an agroecological strategy toward resilience in agricultural systems. *Agronomy Journal* 115, 2657-2664.
- Prost L., Martin G., Ballot R., *et al.*, 2023. Key research challenges to supporting farm transitions to agroecology in advanced economies. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 43, 11.
- Prost L., Reau R., Paravano L., *et al.*, 2018. Designing agricultural systems from invention to implementation: the contribution of agronomy. Lessons from a case study. *Agricultural Systems* 164, 122-132.
- Quinio M., Jeuffroy M.-H., Guichard L., *et al.*, 2022. Analyzing co-design of agroecology-oriented cropping systems: lessons to build design-support tools. *Agronomy for Sustainable Development* 42, 72.
- Röös E., Bajželj B., Smith P., *et al.*, 2017. Greedy or needy? Land use and climate impacts of food in 2050 under different livestock futures. *Global Environmental Change* 47, 1-12.
- Röös E., Bajželj B., Weil C., *et al.*, 2021. Moving beyond organic – A food system approach to assessing sustainable and resilient farming. *Global Food Security* 28, 100487.
- Roostaie S., Nawari N., Kibert C.J., 2019. Integrated sustainability and resilience assessment framework: From theory to practice. *Journal of Cleaner Production* 232, 1158-1166.
- 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.
- Statistique Canada, 2022. Tableau 32-10-0249-01 Utilisation des terres, Recensement de l'agriculture, 2021. DOI : <https://doi.org/10.25318/3210024901-fra>



Statistique Canada, 2024. Tableau 32-10-0045-01 Recettes monétaires agricoles, annuel (x 1 000). DOI : <https://doi.org/10.25318/3210004501-fra>

Tang K.L., Caffrey N.P., Nóbrega D.B., *et al.*, 2017. Restricting the use of antibiotics in food-producing animals and its associations with antibiotic resistance in food-producing animals and human beings: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Planetary Health* 1, e316-e327.

Toffolini Q., 2016. Produire des connaissances actionnables pour la re-conception pas-à-pas de systèmes de culture vers l'agroécologie. Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), Thiverval-Grignon, France.

Torpman O., Rös E., 2024. Are Animals Needed for Food Supply, Efficient Resource Use, and Sustainable Cropping Systems? An Argumentation Analysis Regarding Livestock Farming. *Food Ethics* 9, 15.

Van Zanten H.H.E., Van Ittersum M.K., De Boer I.J.M., 2019. The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security* 21, 18-22.

Wezel A., Bellon S., Doré T., *et al.*, 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 503-515.

Pour citer cet article : Nicolas Devillers, Sabine Conte, Stéphanie Durand, Marie-Noëlle Thivierge, Thomas Puech, *et al.*. Conception d'un système circulaire de polyculture-élevage agroécologique : la Plateforme agroécologique de Sherbrooke (Québec). *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.106-121. [10.17180/ciag-2025-vol106-art09](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art09)

© Sa Majesté le Roi du Canada, représenté par le Ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

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