

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, Unicoir, 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 4.0



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

<https://creativecommons.org/licenses/by/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 HARHAOUI, 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 MORAIN, 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



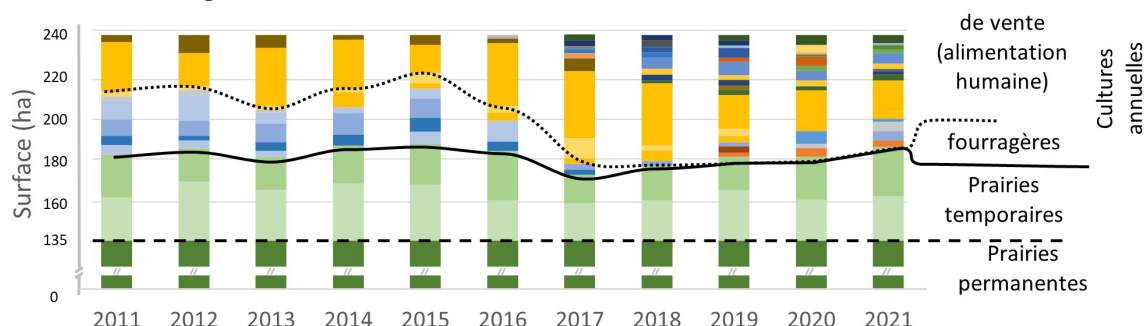
composé de 60 vaches laitières en vêlage groupé d'automne et leur suite (1^{er} vêlage à 3 ans). Les vaches laitières sont complémentées à hauteur d'environ 700 kg de concentrés fermiers par an.

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

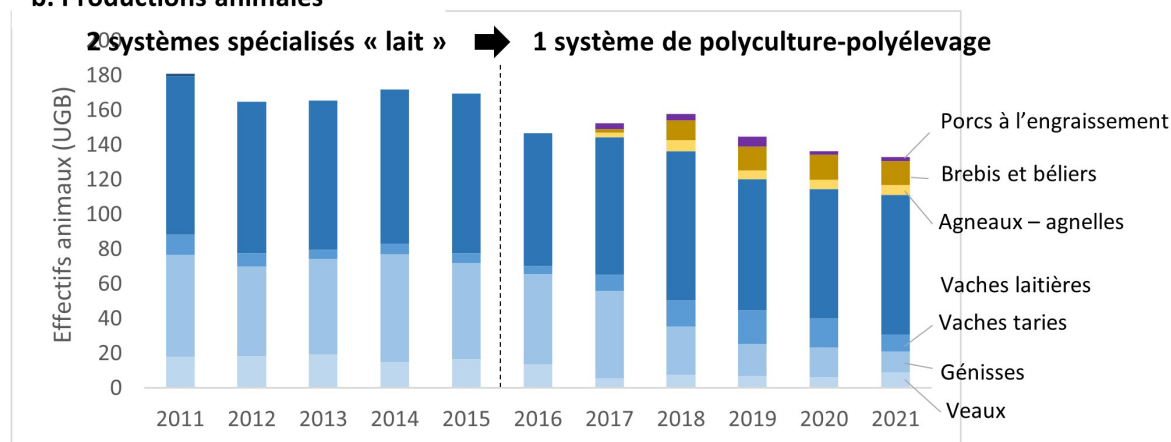


Figure 1 : Evolution des principales productions entre 2011 et 2021 sur l'IE ASTER



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'emplacements (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).

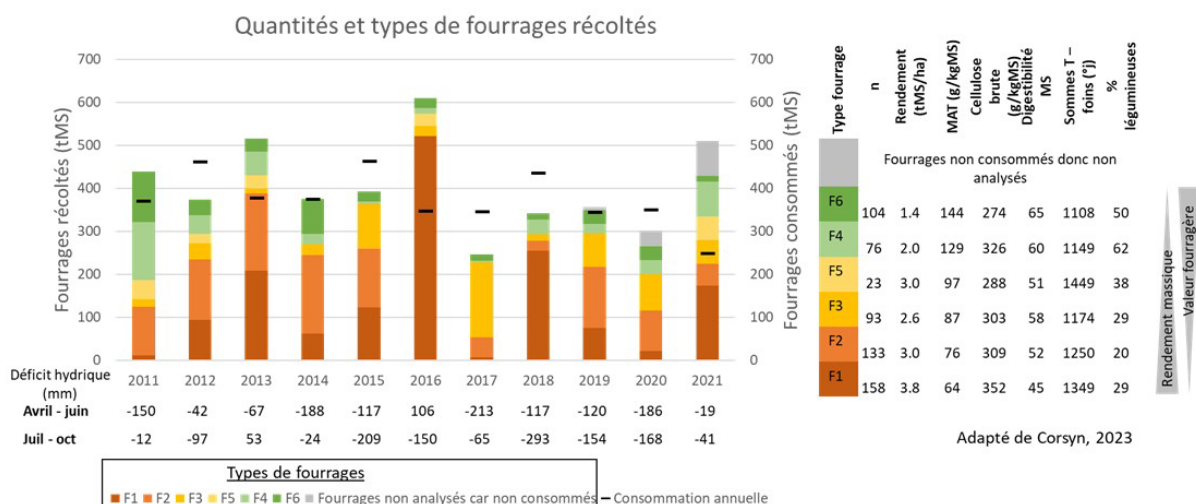


Figure 2 : Evolution des quantités et qualités de fourrages récoltés entre 2011 et 2021 sur l'IE ASTER.

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).

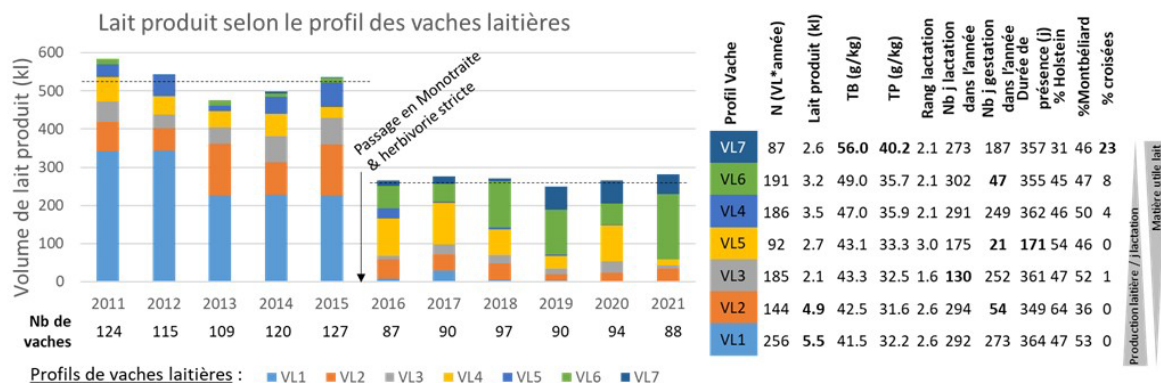


Figure 3 : Evolution de la production laitière selon des profils productifs des vaches laitières sur l'IE ASTER entre 2011 et 2021

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).

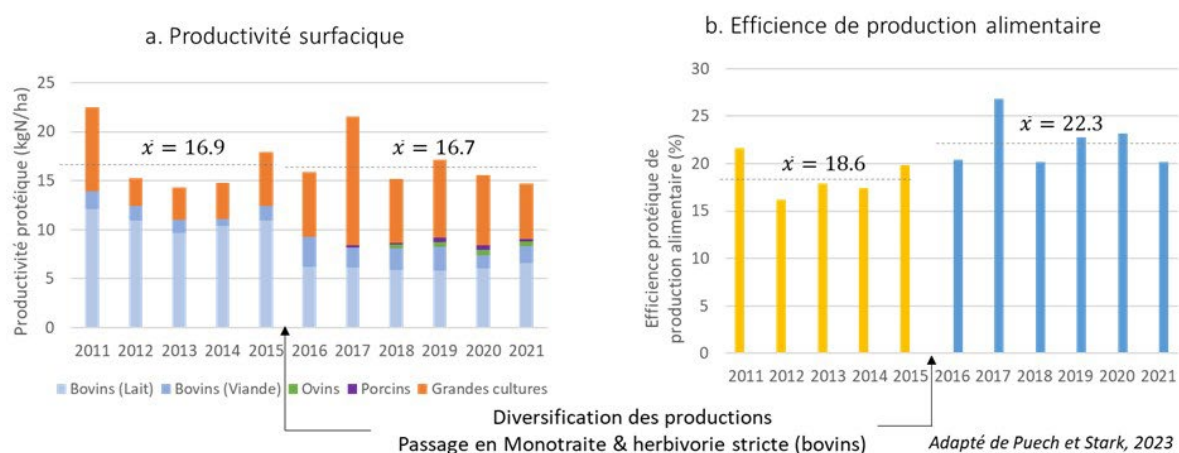


Figure 4 : Evolution a. de la productivité et b. de l'efficacité de production alimentaire sur l'IE ASTER entre 2011 et 2021

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., Guillemain, 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., Veyssset, 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 polyculture-élevage : variabilité des performances techniques et conditions territoriales d'émergence. *Innovations agronomiques*, 2025, 106, pp.1-13. [10.17180/ciag-2025-vol106-art01](https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol106-art01)



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

<https://creativecommons.org/licenses/by/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 HARCHAOUI¹

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