



HAL
open science

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

Quentin Bellanger, Fabrice Beline, Aurélie Wilfart, Fanny Vergely, George Maillard, Yann Evenat, Niels Bize, Souhil Harchaoui

► To cite this version:

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>. <hal-05282744>

HAL Id: hal-05282744

<https://hal.inrae.fr/hal-05282744v1>

Submitted on 25 Sep 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



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 HARCHAOU¹

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

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 maraichères, 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	POLY-CULTURE 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, efficacité, autonomie, énergétique et circularité

Les performances des fermes ont été caractérisées en utilisant trois indicateurs agronomiques, un indicateur d'efficacité, 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'efficacité 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 (IT) 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 kg N·ha⁻¹·an⁻¹) dans les entrées totales (48 %) (fig. 1a) et par le recyclage interne, notamment via les bovins, qui ont fourni 128 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·an⁻¹) et de terreau (39,5 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·an⁻¹) et par le fumier (51,2 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·an⁻¹ pour la ferme en polyculture poly-élevage à 107,9 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·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 kg N·ha⁻¹·an⁻¹, valorisant moins l'azote à travers ses productions.

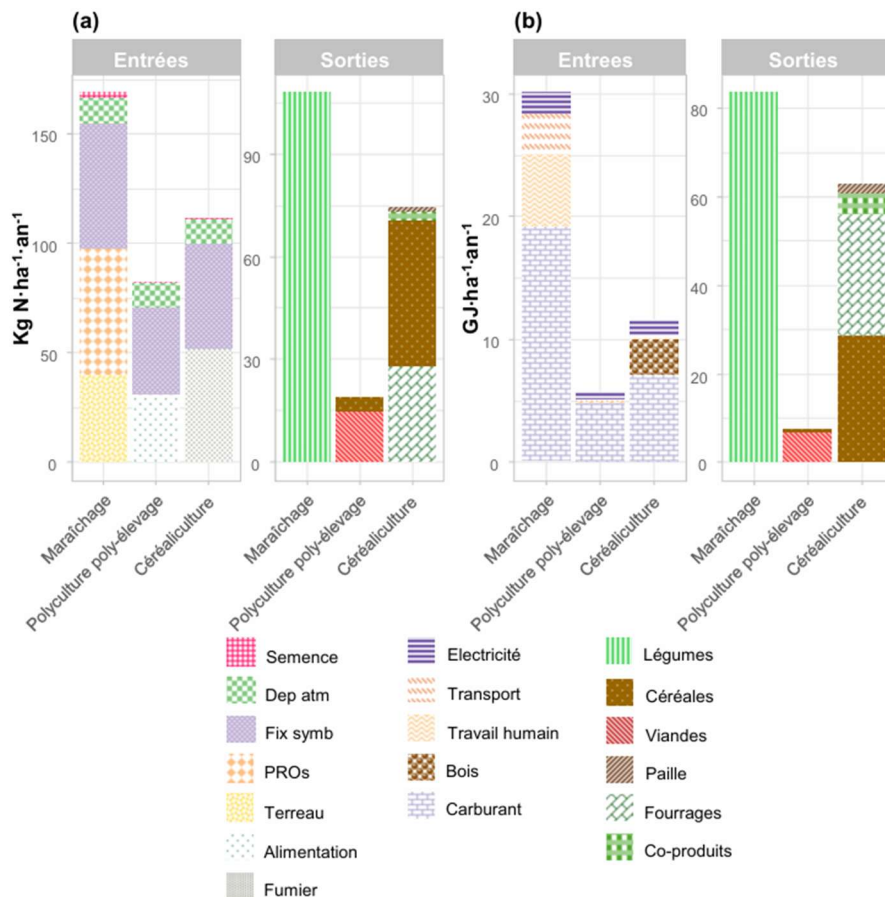


Figure 1 : Entrées et sorties d'azote (kg N·ha⁻¹·an⁻¹) (a) et d'énergie (GJ·ha⁻¹·an⁻¹) (b) pour la ferme maraîchère, polyculture poly-élevage et céréalière).

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 GJ·ha⁻¹·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 GJ·ha⁻¹·an⁻¹), et 89 % provenaient d'énergie non renouvelable. Enfin, la ferme céréalière a investi 11,6 GJ·ha⁻¹·an⁻¹ pour son fonctionnement, dont 2,3 GJ·ha⁻¹·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 ($E_{non-renouvelabl}$: 64 %).

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

INDICATEUR	UNITÉ	MARAICHAGE	POLY-CULTURE POLY-ÉLEVAGE	CÉRÉALICULTURE
$entrees_{EA}$	kg N·ha ⁻¹ ·an ⁻¹	168,9	82,2	111,3
$sorties_{EA}$	kg N·ha ⁻¹ ·an ⁻¹	108	19	75
$surplus_{EA}$	kg N·ha ⁻¹ ·an ⁻¹	61	63	37
NUE_{EA}	%	64	23	67
$autonomie_{EA}$	%	41	63	54
$autonomie_{locale}$	%	65	100	100
EI_{EA}	GJ·ha ⁻¹ ·an ⁻¹	30,1	5,7	11,6
ES_{EA}	GJ·ha ⁻¹ ·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.

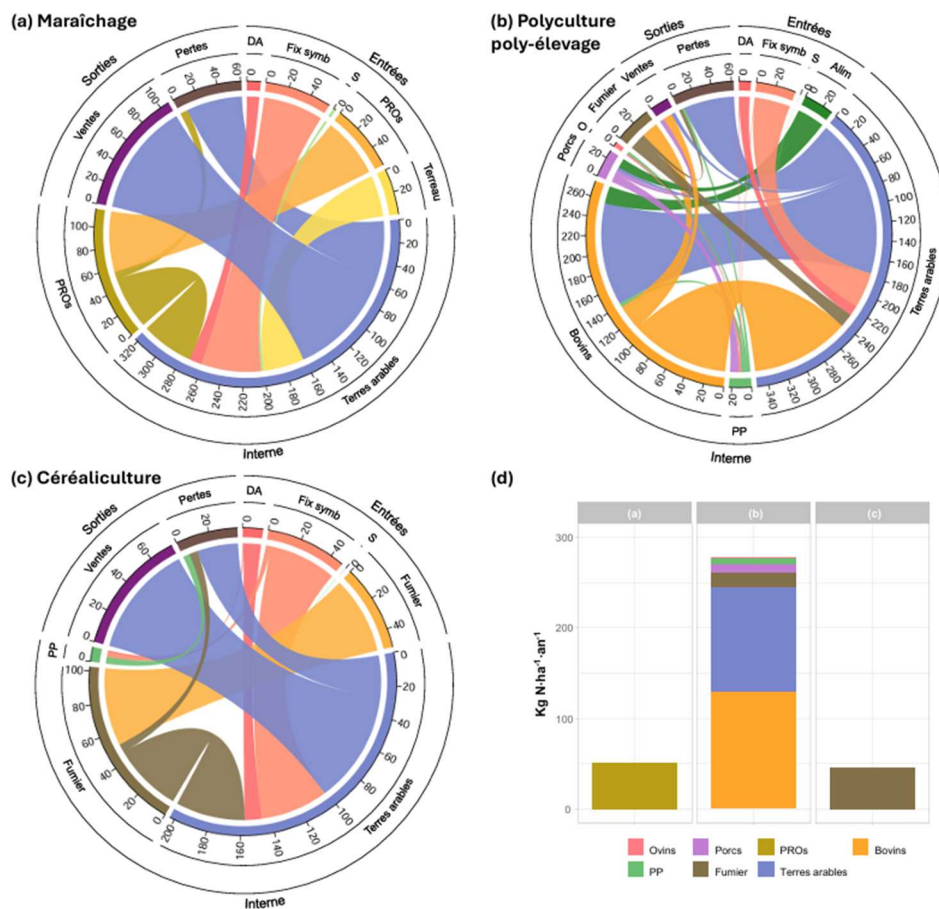


Figure 2 : Flux d'azote (kg N·ha⁻¹·an⁻¹) pour l'exploitation maraîchère (a), polyculture poly-élevage (b) et céréalière (c). Le graphique (d) montre les quantités d'azote échangées (kg N·ha⁻¹·an⁻¹) entre les compartiments de l'exploitation agricole. DA : dépôt atmosphérique, O : ovins, PP : prairies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

ORCID 0000-0001-7482-5660 (Quentin Bellanger) - ORCID 0000-0003-1885-1842 (Fabrice Beline)
ORCID 0000-0002-3593-0334 (Aurélié Wilfart) - ORCID 0000-0002-6407-8291 (Souhil Harchaoui)

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., Favardin, 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., Luttkholt, 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., Veysset, 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., Veysset, 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., Veysset, 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.*



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.