

L'agroécologie : une solution viable et durable pour nourrir les territoires, la France, l'Europe

PREFALIM Policy Brief¹

N°2

Février 2026

Julia Le Noë
IRD, UMR iEES

L'agriculture biologique est souvent présentée comme intrinsèquement moins productive que l'agriculture conventionnelle. Les travaux présentés ici montrent au contraire que, pour un même contexte pédoclimatique, les différences de production s'expliquent avant tout par les niveaux de fertilisation azotée : la relation entre rendements et fertilisation est identique en agriculture biologique et conventionnelle. Il est donc possible d'intensifier écologiquement l'agriculture biologique. Ce constat permet d'opérer un glissement conceptuel et méthodologique important : il ne s'agit pas tant d'évaluer des techniques isolées que d'analyser des conditions de possibilité d'une transition agroécologique. Notre approche de modélisation permet de tester des reconfigurations cohérentes des systèmes agroalimentaires fondées sur trois leviers principaux : évolution des régimes alimentaires avec une réduction de moitié des protéines animales, reconnexion territoriale entre cultures et élevage favorisant le recyclage du fumier, et insertion de légumineuses dans des rotations longues. Combinés, ces leviers permettent de diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre, d'ammoniac et les excédents azotés responsables de la pollution des eaux, sans compromettre la souveraineté alimentaire. Au contraire, en France comme en Europe, ces scénarios réduisent fortement la dépendance aux importations d'aliments pour animaux et aux fertilisants de synthèse, tout en restant compatibles avec la sécurité alimentaire mondiale. Ainsi, la transition agroécologique offre une voie crédible vers un système agricole à la fois productif, autonome et durable.

Résultats clés

- Organic agriculture is not inherently less productive than conventional agriculture
- An agroecological transition requires systemic reconfiguration of agri-food systems
- Shift in diet, integrated crop and livestock farming and increase leguminous in crop rotation allow food sovereignty while improving sustainability

¹ Ce travail s'inscrit dans le projet PREFALIM du PEPR exploratoire FairCarboN et a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-23-PEXF-0004 – projet PREFALIM.

Cette note fait état de plus de dix ans de travaux scientifiques auxquels l'autrice de ces lignes a significativement contribué dans sa thèse, ses deux post-doc et ses recherches en cours. Ces recherches ont été initiées dans le cadre du programme Piren-Seine et ont impliqué de nombreux autres auteurs et scientifiques en France, en Europe et dans le monde, dont les travaux sont cités dans la présente note.



En France et en Europe, l'agriculture se trouve face à différentes options pour son futur. Dans un contexte marqué par les difficultés économiques croissantes d'une partie des agriculteurs, la relativisation des enjeux environnementaux, et des reculs sur les engagements de la COP21, ces choix d'orientation sont décisifs pour l'atténuation du changement climatique, la protection de l'environnement et la cohésion sociale des territoires. Sur le plan environnemental, le constat est bien établi : l'agriculture contribue de manière significative au dépassement des limites planétaires. Elle est à l'origine d'environ un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre et constitue le premier facteur de perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore (Campbell et al., 2017; Crippa et al., 2021).

La question se pose : quelle agriculture pour demain, capable de répondre aux enjeux de durabilité écologique et sociaux ? L'agroécologie, et en particulier l'agriculture biologique qui a le mérite de présenter un cahier des charges, est une voie possible. Elle fait toutefois l'objet de critiques récurrentes, un irréductible « yield gap » d'environ 30 % rendrait l'agriculture biologique incapable de nourrir durablement les territoires, en France, en Europe, dans le monde. Ses rendements supposément plus faibles entraîneraient ainsi un coût environnemental plus élevé, lié à une occupation accrue des terres. Cette affirmation est-elle fondée ? Les systèmes agroécologiques sont-ils réellement incompatibles avec les enjeux de production alimentaire à grande échelle ? Ou pour le dire autrement, dans quelles conditions l'agroécologie peut-elle être une solution viable et durable ?

Approche scientifique

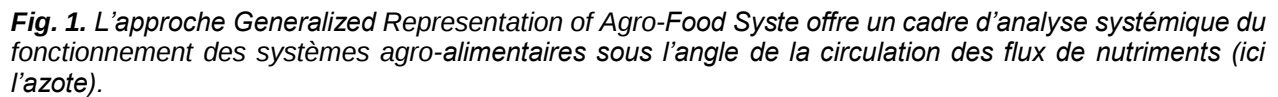
Depuis plus de dix ans, nos travaux ont permis d'apporter des réponses quantitatives et robustes à ces différentes questions. Ils s'appuient sur le développement d'une approche simple et intégrée de représentation des flux biogéochimiques d'azote (N), de phosphore (P) et de carbone (C) au sein des systèmes agroalimentaires : GRAFS (*Generalized Representation of Agro-Food Systems* ; Billen et al., 2014). Cette approche offre une vision systémique du fonctionnement des systèmes agro-alimentaires en révélant les liens structurels entre modes de fertilisation, taille du cheptel, dépendance aux importations, pollution environnementale, concentration urbaine et régime alimentaire (Harter et al., 2026; Le Noë et al., 2017).

Initialement conçue comme un outil de comptabilité des flux mobilisant les statistiques agricoles, l'approche GRAFS a rapidement acquis un statut prédictif en révélant l'existence d'une relation empirique robuste entre fertilisation azotée et production agricole à l'échelle de la ferme (Billen et al., 2018), du territoire (Billen et al., 2024), et des nations (Lassaletta et al., 2014). Couplée à d'autres modèles simples et largement validés, GRAFS permet ainsi d'évaluer différents scénarios agricoles sur un ensemble d'indicateurs de durabilité :

- Les bilans d'azote et de phosphore sur les terres arables, indicateurs clés de la pollution des eaux ;
- Le bilan carbone des sols agricoles, reflétant à la fois la fertilité des sols et leur potentiel de stockage du carbone ;
- Les émissions de gaz à effet de serre ;



- Cette approche systémique constitue le socle scientifique des résultats présentés dans ce *policy brief*.



La relation observée entre fertilisation azotée et rendements azotés a été observée à différentes échelles et notamment à l'échelle de la ferme. Les observations faites à cette échelle sont essentielles : elles montrent que, pour un contexte pédoclimatique donné, les fermes en agriculture conventionnelle et en agriculture biologique se positionnent sur une même courbe fertilisation-

rendement dès lors que l'on raisonne à l'échelle de la rotation et non de la culture (Fig. 2 (Billen et al., 2024, 2018)). Ces résultats, observés dans de nombreux contextes agricoles contredisent l'affirmation largement répandue selon laquelle l'agriculture biologique serait intrinsèquement moins productive que l'agriculture conventionnelle. Nous montrons au contraire que les différences de rendement tiennent avant tout à l'apport total en azote sur la rotation, et non au statut « biologique » ou « conventionnel » en tant que tel. Il est donc possible d'intensifier écologiquement l'agriculture biologique,



c'est-à-dire les rendements sans recourir aux engrais azotés de synthèse, par l'introduction de légumineuses dans les rotations de culture et par des apports de

matières organiques telles que les fumiers, les composts ou le recyclage des urines et matières fécales.

$$\text{Rendement} = Y_{\text{max}} * \text{Fertilisation} / (\text{Fertilisation} + Y_{\text{max}})$$

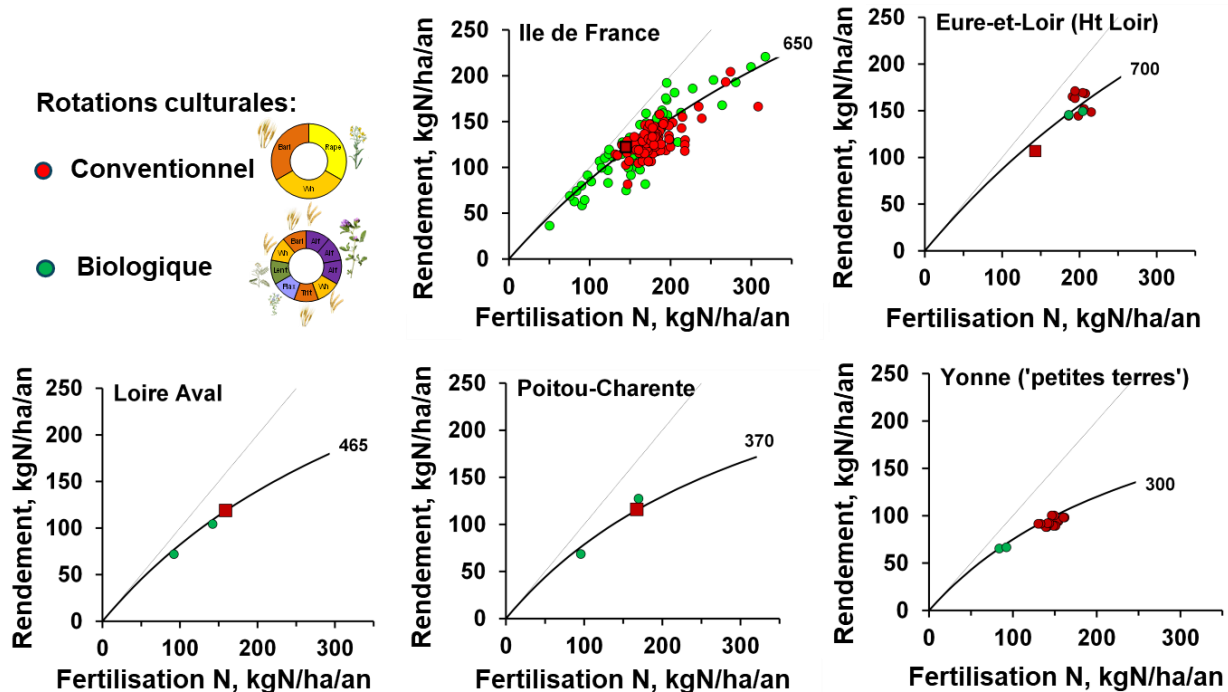


Fig. 2. Observations empiriques de la relation logistique Fertilisation-Rendement sur un cycle de rotation. En abscisse, la fertilisation totale en azote sur le cycle de rotation complet (fertilisant minéraux, fixation symbiotique, dépôts atmosphériques, fumier et autres matières organiques exogènes) ; en ordonnée, le rendement à l'hectare sur l'ensemble du cycle de rotation exprimé en kgN-exporté/ha/an. Les données montrent que, pour un même contexte pédoclimatique, les fermes en agriculture biologique et en agriculture conventionnelle se positionnent sur une même courbe caractérisée par un certain potentiel de fertilité, noté ici Y_{max} . La figure est adaptée de la publication de Billen, Le Noë, Garnier, (2018) dans la revue *Science of the Total Environment*.

Quels leviers pour des scénarios agro-écologiques ?

Ainsi le développement de scénarios agro-écologiques n'est pas qu'une question de changement des pratiques agricoles mais de reconfiguration des systèmes agro-alimentaires adaptés à ces changements. Nos travaux explorent l'effet de trois leviers principaux :

- Des modifications du régime alimentaire avec une diminution des apports protéiques journaliers – que l'on peut estimer en kgN/pers/an, l'azote étant l'un des principaux constituants des protéines et l'élément dont on suit ici le devenir dans le système agro-alimentaire (Fig. 1) –, actuellement de l'ordre de 6 kgN/pers/an en moyenne en France et en Europe, contre environ 5



kgN/pers/an pour différentes recommandations nutritionnelles (Couturier et al., 2017; Willett et al., 2019). Nos scénarios intègrent ces recommandations. La part de produits animaux est la plus affectée par ces changements, avec une réduction de moitié de la consommation de viande et de produits laitiers dans nos différents scénarios. Nous avons parfois testé des options plus radicales, végétan ou végétarienne à titre exploratoire (voir infra section "interaction entre les leviers", Garnier and Billen, 2025; Le Noë et al., 2023).

- La généralisation des systèmes de polyculture élevage fourrager et herbager, i.e., la reconnexion à l'échelle de la ferme ou à l'échelle des territoires des systèmes d'élevage et de culture. Cette reconnexion permet de faciliter le recyclage des fumiers et effluents d'élevage vers les terres cultivées, réduisant ainsi la dépendance aux engrais azotés de synthèse. Une option supplémentaire, explorée dans certains scénarios, concerne le recyclage des urines et des matières fécales humaines, renforçant encore la circularité des flux de nutriments.
- La généralisation des pratiques de l'agriculture biologique, reposant sur des rotations longues intégrant des légumineuses fixatrices d'azote, l'absence de recours à l'azote de synthèse issu du procédé Haber-Bosch, et l'abandon des fertilisants phosphorés minéraux.

Viabilité et durabilité des systèmes agro-écologiques

En combinant ces différents leviers dans l'approche GRAFS couplée à d'autres modèles (le modèle AMG – Andriulo,

Mary, Guérif, des noms des concepteurs – pour le carbone organique du sol, Andriulo et al., 1999 ; le modèle DPPS – *Dynamic Phosphorus Pool Simulator* – pour le phosphore du sol, Wolf et al., 1987), nos travaux ont montré que des systèmes agroécologiques permettent de concilier production alimentaire et une forte amélioration des performances environnementales dans des contextes très variés : en Europe et notamment en France, en Espagne ou en Autriche, en Chine et à l'échelle globale.

Préservation de l'environnement

➤ Effets positifs

Dans tous les contextes où ces scénarios ont été développés, nos résultats montrent une division par deux du bilan azoté des terres arables et des prairies permanentes, de la volatilisation de l'ammoniaque, et des émissions de gaz à effet de serre (Billen et al., 2018; Garnier et al., 2019; Garnier and Billen, 2025; Le Noë et al., 2023; Wang et al., 2025). La réduction du bilan azoté permet ainsi d'atteindre partout les normes de potabilité et réduit les risques d'eutrophisation des cours d'eau (prolifération d'algues vertes). L'abandon des fertilisants issus du procédé Haber-Bosch, l'introduction de légumineuses dans les rotations et la reconnexion des systèmes d'élevage et de culture à l'échelle des territoires permettent en outre une hausse marquée de l'efficacité d'utilisation de l'azote, qui passe de 59 à 76 % dans le cas européen (Garnier and Billen, 2025).

➤ Compromis avec d'autres indicateurs écologiques

La réduction des émissions de gaz à effet s'explique principalement par la baisse du cheptel (et des émissions de méthane



associées), elle-même induite par une demande en produits animaux plus sobre, explicitement intégrée comme levier dans les scénarios. D'après nos simulations, ces baisses d'émissions s'accompagnent toutefois d'un compromis avec le stockage de carbone dans les sols (Le Noë et al., 2019; Wang et al., 2025). En effet, la diminution du cheptel et de la fertilisation azotée totale entraînent une réduction des effluents d'élevage, de la production agricole et, par conséquent, des apports de résidus de culture, ce qui diminue le stockage du carbone organique des sols (Chenu et al., 2019).

Ce résultat doit cependant être interprété avec prudence, car les scénarios ne prennent pas en compte les effets des changements de pratiques fertilisantes sur la production de résidus aériens et racinaires, susceptibles de compenser cette baisse de la production récoltée (Poeplau, 2016). Par exemple, des travaux scientifiques menés à INRAE ont montré un stockage du carbone organique significativement plus élevé dans des sols cultivés en agriculture biologique *versus* conventionnelle. Ces recherches montraient également que certaines bonnes pratiques de gestion, telles que les cultures intercalaires et de couverture, non prises en considération ici, permettent des apports supplémentaires de matière organique et favorisent le stockage du carbone organique dans les sols (Autret et al., 2016).

Quoiqu'il en soit, la baisse de carbone organique des sols estimée dans nos travaux reste modeste et, en dépit de cette baisse, nous montrons bien une réduction de moitié des émissions de gaz à effet de serre.

➤ Interaction entre les leviers

L'exploration d'un espace biophysique des possibles, testant l'effet de différentes combinaisons des trois principaux leviers susmentionnés, met en évidence le rôle prépondérant du régime alimentaire comme condition de mise en œuvre et de succès des deux autres leviers. Plus la réduction de la demande en produits animaux est importante, plus les surfaces agricoles diminuent et plus les marges de manœuvre pour déployer des systèmes agroécologiques sont élevées (Erb et al., 2016; Le Noë et al., 2023; Wang et al., 2025).

➤ Quid du phosphore ?

Si l'insertion des légumineuses permet d'augmenter les apports azotés dans les systèmes en agriculture biologique, qu'en est-il du phosphore apporté seulement via le recyclage des fumiers ? Existe-t-il un risque de carence ? *A minima* pour le cas de la France (nous n'avons pas répondu à cette question pour d'autres échelles), la réponse est non. En effet, l'agriculture française a fait un usage disproportionné des fertilisants minéraux en phosphore entre les années 1960 et 1990 (Le Noë et al., 2018). En conséquence, les sols agricoles français sont fortement enrichis en phosphore, essentiellement importé du Maghreb – Maroc et Tunisie en tête.

Cet héritage est une chance pour la France : il offre d'importantes réserves dans lesquelles puiser, le temps de mettre en œuvre les changements structurels de reconnexion de l'élevage et des cultures. Nous avons estimé que ces réserves restent largement suffisantes, au moins jusqu'en 2075 (Le Noë et al., 2020). Il convient toutefois d'indiquer que, sur le long terme, seul un recyclage du phosphore contenu dans



les urines et matières fécales permet un bouclage du cycle du phosphore et d'éviter la fuite lente du phosphore des terres agricoles vers les eaux usées, puis les océans. Le phosphore étant une ressource minière non renouvelable, une fois exporté vers les milieux marins, il est perdu pour des millions d'années. Par ailleurs, les modélisations territoriales que nous avons réalisées n'excluent pas que certaines fermes en France souffrent de carences en phosphore nécessitant des apports ponctuels de fertilisants minéraux ou organiques.

Autonomie et souveraineté alimentaire

➤ Souveraineté alimentaire

Nos recherches montrent que la préservation de l'environnement rendue possible par la généralisation de scénarios agro-écologiques permet, de surcroît, d'améliorer la souveraineté alimentaire. Les modifications de régimes alimentaires permettent, en effet, de diminuer les besoins de la population humaine et ceux du cheptel tandis que la reconnexion de l'élevage et des cultures permet de répondre localement aux besoins du cheptel. Dans les zones étudiées en France, en Autriche, en Europe et en Chine, nos résultats indiquent que l'immense majorité des territoires pourraient être auto-suffisants tant pour la consommation humaine qu'animale (Billen et al., 2018; Garnier and Billen, 2025; Le Noë et al., 2023; Wang et al., 2025). Les quelques exceptions observées concernent principalement les zones urbaines à forte densité qui dépendraient toujours d'importations provenant d'un arrière-pays nourricier.

➤ Peut-on vraiment se le permettre ?

S'il est vrai que la production agricole baisse, cette évolution ne met pas en danger la sécurité alimentaire mondiale. Rappelons au passage qu'en dépit des importants excédents alimentaires, en 2023 environ 733 millions de personnes (9% de la population mondiale) souffrent encore de sous-nutrition dans le monde (FAO et al., 2024), principalement en raison de fortes inégalités d'accès à la nourriture, renforcées par l'abandon des programmes d'aide alimentaire (Gentilini, 2022; WFP, 2025). (Billen et al., 2014) montrent qu'avec un régime alimentaire équitable (i.e., sans inégalités alimentaires), l'introduction des légumineuses et la reconnexion de l'élevage et des cultures, la plupart des régions du monde resteraient excédentaires même sans engrais Haber-Bosch et pourraient largement subvenir aux besoins des régions déficitaires (notamment le Maghreb, le Japon, et le Moyen Orient). La souveraineté alimentaire régionale ne menace donc pas la sécurité alimentaire globale, mais simplement les chaînes d'approvisionnement globales de l'industrie agro-alimentaire qui captent actuellement l'essentiel de la valeur produite, au détriment des producteurs agricoles (Cucagna and Goldsmith, 2018).

Recommandations

Les résultats synthétisés dans cette note montrent que les critiques adressées à l'agriculture biologique reposent sur une vision étroite, qui ignore les interactions entre pratiques de production, régimes alimentaires et organisation des



systèmes agroalimentaires. Ils invitent ainsi à déplacer les termes du débat sur l'agriculture biologique et son prétendu déficit intrinsèque de productivité. La question centrale n'est pas celle de la performance de ces pratiques prises isolément, mais bien celle de la reconfiguration des systèmes agricoles et agroalimentaires permettant leur mise en œuvre à grande échelle.

En adoptant une approche systémique, nos résultats démontrent que l'agriculture biologique est viable et durable

lorsqu'elle est intégrée à des systèmes agro-écologiques, capables de concilier souveraineté alimentaire et réduction des pressions environnementales. À ce titre, elle constitue une option crédible pour l'avenir de l'agriculture. Pour la France, une telle orientation offrirait l'opportunité de se positionner comme chef de file de la transition agro-écologique, dans un contexte mondial marqué par la crise climatique et les tensions géopolitiques, et alors que la nécessité d'insuffler de l'espoir en réinventant de nouveaux modèles est particulièrement forte.

References

- Andriulo, A.E., Mary, B., Guérif, J., 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie* 19, 365–377.
- Autret, B., Mary, B., Chenu, C., Balabane, M., Girardin, C., Bertrand, M., Grandeau, G., Beaudoin, N., 2016. Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008>
- Billen, G., Aguilera, E., Einarsson, R., Garnier, J., Gingrich, S., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Le Noë, J., Sanz-Cobena, A., 2024. Beyond the Farm to Fork Strategy: Methodology for designing a European agro-ecological future. *Science of The Total Environment* 908, 168160. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168160>
- 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. *Global Food Security* 3, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>
- Billen, G., Le Noë, J., Garnier, J., 2018. Two contrasted future scenarios for the French agro-food system. *Science of The Total Environment* 637–638, 695–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.043>
- Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M., Hall-Spencer, J.M., Ingram, J.S.I., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J.A., Shindell, D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *E&S* 22, art8. <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>
- Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J., 2019. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research* 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Couturier, C., Charru, M., Doublet, S., Pointereau, P., 2017. Le Scénario Afterres 2050 (Solagro).
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat Food* 2, 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>



- Cucagna, M.E., Goldsmith, P.D., 2018. Value adding in the agri-food value chain. *IFAM* 21, 293–316. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2017.0051>
- Erb, K.-H., Lauk, C., Kastner, T., Mayer, A., Theurl, M.C., Haberl, H., 2016. Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nat Commun* 7, 11382. <https://doi.org/10.1038/ncomms11382>
- FAO, UNICEF, Internationaler Fonds für Landwirtschaftsentwicklung, Welternährungsprogramm, Weltgesundheitsorganisation, 2024. Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms, The state of food security and nutrition in the world. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Garnier, J., Billen, G., 2025. Toward sustainability of territorial agro-food systems in Europe: indicators for assessing alternative scenarios. *Environ. Res. Lett.* 20, 094059. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adf97e>
- Garnier, J., Le Noë, J., Marescaux, A., Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Silvestre, M., Thieu, V., Billen, G., 2019. Long-term changes in greenhouse gas emissions from French agriculture and livestock (1852–2014): From traditional agriculture to conventional intensive systems. *Science of The Total Environment* 660, 1486–1501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.048>
- Gentilini, U. (editor), 2022. Social Protection, Food Security and Nutrition: An Update of Concepts, Evidence and Select Practices in South Asia and Beyond. World Bank. <https://doi.org/10.1596/38210>
- Harter, L., Einarsson, R., Lata, J.-C., Le Noë, J., 2026. Thirty years of nitrogen dynamics in European agri-food systems: a territorial metabolic perspective. *Environ. Res. Lett.* 21, 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae452e>
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9, 105011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105011>
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J., 2019. Carbon Dioxide Emission and Soil Sequestration for the French Agro-Food System: Present and Prospective Scenarios. *Front. Sustain. Food Syst.* 3, 19. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00019>
- Le Noë, J., Billen, G., Garnier, J., 2017. How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus, and carbon fluxes: The generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Science of The Total Environment* 586, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.040>
- Le Noë, J., Garnier, J., Billen, G., 2018. Phosphorus management in cropping systems of the Paris Basin: From farm to regional scale. *Journal of Environmental Management* 205, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.039>
- Le Noë, J., Gingrich, S., Pichler, M., Roux, N., Kaufmann, L., Mayer, A., Lauk, C., 2023. Combining biophysical modeling and Polanyian theory pleads for a re-embedding of the agricultural system in 2050 in Austria. *Environmental Science & Policy* 139, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.11.006>
- Le Noë, J., Roux, N., Billen, G., Gingrich, S., Erb, K.-H., Krausmann, F., Thieu, V., Silvestre, M., Garnier, J., 2020. The phosphorus legacy offers opportunities for agro-ecological transition (France 1850–2075). *Environ. Res. Lett.* 15, 064022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab82cc>
- Poeplau, C., 2016. Estimating root: shoot ratio and soil carbon inputs in temperate grasslands with the RothC model. *Plant Soil* 407, 293–305. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3017-8>
- Wang, Q., Barré, P., Deng, O., Lan, T., Zeng, M., Gao, X., Le Noë, J., 2025. Soil carbon sequestration, climate change mitigation, nitrogen pollution and agro-food supply:



- navigating trade-offs in future cropland management strategies. *Environ. Res. Lett.* 20, 044004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adbc04>
- WFP, 2025. Food Security Impact of Reduction in WFP Funding. Rome: World Food Programme.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L.J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J.A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., Afshin, A., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S.E., Srinath Reddy, K., Narain, S., Nishtar, S., Murray, C.J.L., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393, 447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Wolf, J., de Wit, C.T., Janssen, B.H., Lathwell, D.J., 1987. Modeling Long-Term Crop Response to Fertilizer Phosphorus. I. The Model¹. *Agronomy Journal* 79, 445–451. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900030008x>