innovations agronomiques

n°102 / Mai 2025



Empreinte carbone

dans les activités agricoles et agroalimentaires

Ce numéro fait suite au Carrefour de l'innovation agronomique dédié à la réduction de l'empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires qui s'est déroulé le 19 septembre 2024

Ce numéro fait le point sur les innovations dans la réduction de l'empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires.

- L'analyse de la trajectoire de réduction de l'empreinte carbone dans les différentes activités liées à l'agriculture et l'alimentation (cultures, élevage, intrants agricoles, production d'aliments) à partir de certaines innovations.
- Les conditions pour atteindre le plus rapidement possible la neutralité carbone dans les secteurs agricole et agroalimentaire, sous forme d'atelier.
- La façon dont les acteurs de l'agriculture et de l'agro-alimentaire s'engagent pour l'innovation visant la neutralité carbone.

// Crédit photo : Bertrand NICOLAS / INRAE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE

Innovations Agronomiques
Agriculture / Alimentation / Environnement

Innovations Agronomiques

Volume 102 – Mai 2025

Empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires

Ce numéro fait suite au carrefour de l'innovation agronomique dédié à la réduction de l'empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires qui s'est déroulée le 19 septembre 2024.

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 : Lionel Jordan-Meille (Bordeaux Sciences Agro), Yannick Briard (Cirad), Yves Le Roux (Université de Lorraine), Pierre Renault (INRAE), Jean-Philippe Steyer (INRAE), Sébastien Curet (Oniris Nantes), Cyril Toublanc (Oniris Nantes), Olivier Rouaud (Oniris Nantes), Philippe Prévost (Agreenium), Max Huguet (Agreenium), Aurélie Gauguery (INRAE).

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) : 978-2-7380-1479-5

ISBN (ePub) : 978-2-7380-1480-1

DOI : https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol102

Pour citer ce numéro : Collectif. (2025). *Innovations agronomiques, volume 102, mai 2025. Empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires* (Version 1). Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol102

Photo de couverture : Bertrand Nicolas / INRAE

Licence : CC BY 4.0

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

Yves LE ROUX et Guillaume HENRY, 2025 - **Contribution des secteurs agricole et agroalimentaire à la neutralité carbone française : scénarios prospectifs et trajectoires potentielles.** Innovations Agronomiques 102, 1-14 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art01**

Catherine HENAULT, Mohamed ALKASSEM-ALOSMAN, Mustapha ARKOUN, Elodie BARBIER, Adeline BESNAULT, Florian BIZOUARD, Hocine BOURENNANE, Virginie BOURION, Henri BREFORT, Thomas EGLIN, Guillaume GUYERDET, Alain HARTMANN, Cécile LE GALL, Cécile REVELLIN, Nicolas SABY et Camille ROUSSET, 2025 - **Diminuer les émissions de gaz à effet de serre par les sols en réduisant N2O en N2.** Innovations Agronomiques 102, 15-27 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art02**

Cédric BOUDES, 2025 - **Les engrais bas carbone : un levier de réduction des émissions de GES des filières agricoles.** Innovations Agronomiques 102, 28-39 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art03**

Sébastien CURET et Hugo BONZANO, 2025 - **La réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie agroalimentaire : Enjeux, leviers et perspectives.** Innovations Agronomiques 102, 40-45 **https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art04**

Gabrielle BASSET, Yannick SCHAFER, Martine BABO, Inès LAIRD, Paul MAZERAND et Philippe PREVOST, 2025 - **La gestion de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux : où en est-on ? Quelles innovations en faveur d'une trajectoire de réduction de l'émission de gaz à effet de serre ?**
Innovations agronomiques 102, 46-53
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art05

Claire ROGEL-GAILLARD, Jérôme MOUSSET, Jean-Louis DUBOURG, Philippe SOMMER et Carine BARBIER, 2025 - **Les trajectoires de transformation des systèmes agri-alimentaires pour une neutralité carbone.**
Innovations Agronomiques 102, 54-60.
https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art06

Contribution des secteurs agricole et agroalimentaire à la neutralité carbone française : scénarios prospectifs et trajectoires potentielles

Yves LE ROUX[1,2], Guillaume HENRY[2]

[1] Laboratoire Animal et Agroécosystèmes, USC INRAE 340, Université de Lorraine, 54518 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex Université de Lorraine,

[2] Chaire industrielle AgroMétha, Université de Lorraine-ENSAIA, 2 Av. de la Forêt de Haye, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy

Correspondance : yves.leroux@univ-lorraine.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art01

Résumé

Représentant 24 % de l'empreinte carbone nationale, l'agriculture et l'agro-alimentaire se distinguent par des émissions principalement de méthane (CH_4), de protoxyde d'azote (N_2O) et à la marge par le dioxyde de carbone (CO_2). Les objectifs de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) est une réduction du secteur de 46 % d'ici 2050. Deux stratégies sont discutées. La première repose sur un maintien de la production associée à des leviers agronomiques, zootechniques et technologiques, il sera alors difficile d'atteindre les 46 %. La deuxième stratégie basée sur des scénarios intégrés permet d'atteindre les objectifs mais s'appuient sur des hypothèses de ruptures et une baisse du cheptel ruminant comme hypothèse pour tous les scénarios. Au vu de la disponibilité de biomasse, il sera difficile de répondre à l'ensemble des enjeux : décarbonation, maintien de la production agricole, production énergétique, politique exportatrice et autonomie alimentaire, le tout dans le respect de l'agroécologie. Des choix seront à faire.

Mots-clés : Transition, décarbonation, agriculture, biomasse, méthane, scénario

Abstract: Contribution of the French agricultural and agri-food sectors to carbon neutrality: prospective scenarios and potential trajectories

Accounting for 24% of the national carbon footprint, the agriculture and agri-food sector is characterized by emissions mainly of methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O) and, to a lesser extent, carbon dioxide (CO_2). The National Low Carbon Strategy (SNBC) aims to cut down the sector's emissions by 46% by 2050. Two decarbonization strategies are possible. Maintaining agricultural production using agronomic, zootechnical and technological levers. Some of these levers are still immature and could not be sufficient to achieve the target of 46%. The second strategy is based on integrated scenarios aiming the SBNC objectives and working with breakthrough assumptions and a sharp decline in the ruminant livestock. According to the current state of biomass resources availability, it will be very difficult to me*et al*l the challenges identified: decarbonization, maintaining livestock farming, significant energy production, a massive export policy and food self-sufficiency while respecting a genuine agro-ecology.

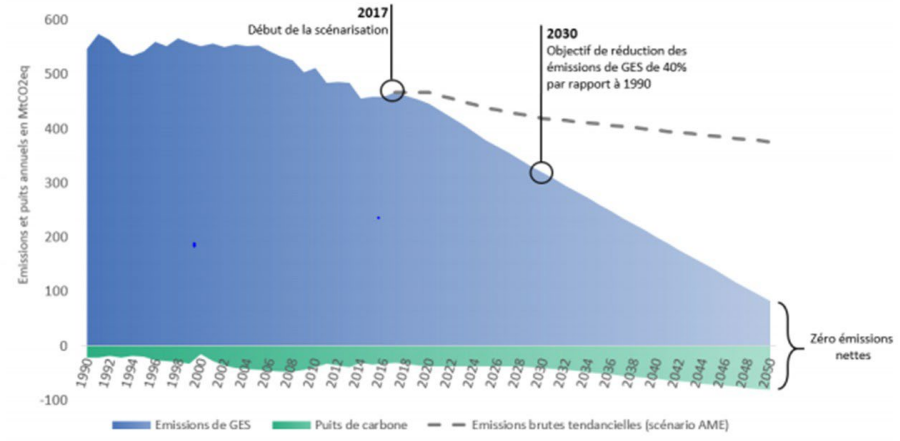
Keywords: Transition, decarbonation, agriculture, biomass, methane, scenario

1. De la volonté politique à la mise en œuvre réglementaire

Annoncé en décembre 2019, le Pacte vert européen (Commission européenne, 2024) veut faire de l'Union européenne la première zone atteignant la neutralité climatique en 2050. Ce pacte vert ou Green Deal est notamment une réponse de l'Europe aux engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris en 2015. La feuille de route proposée vise à agir de façon systémique sur l'ensemble des

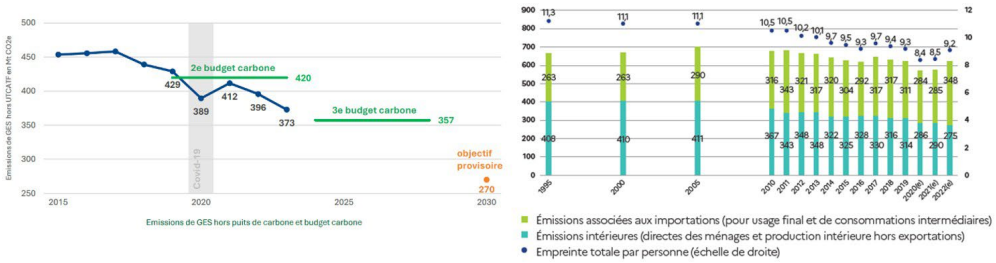
secteurs de l'économie : énergie, industrie, transport alimentation et agriculture… En 2023, le Conseil européen et le Parlement européen ont adopté un nouvel objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2030 (-55 % net par rapport à 1990) encore appelé « Fit for 55 ».

Pour la France, les premières réflexions sur la décarbonation ont été introduites dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) du 17 août 2015 et déclinées de façon opérationnelle dans la Stratégie Bas Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE). La SNBC a été revue une première fois (SNBC-2, Figure 1) avec les budgets « carbone » associés, une nouvelle révision de la SNBC (SNBC-3 et PPE-3) est en cours, rendue nécessaire pour s'insérer dans les ambitions climatiques européennes, qui s'est concrétisée par l'adoption du paquet « Fit for 55 ».



**Les émissions « tendancielles » sont calculées à l'aide d'un scénario dit « Avec Mesures Existantes » qui prend en compte les politiques déjà mises en places ou actées en 2017.*

Figure 1 : Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 1990 et 2050, objectifs SNBC-2 (SNBC, 2024).



(a) (b)

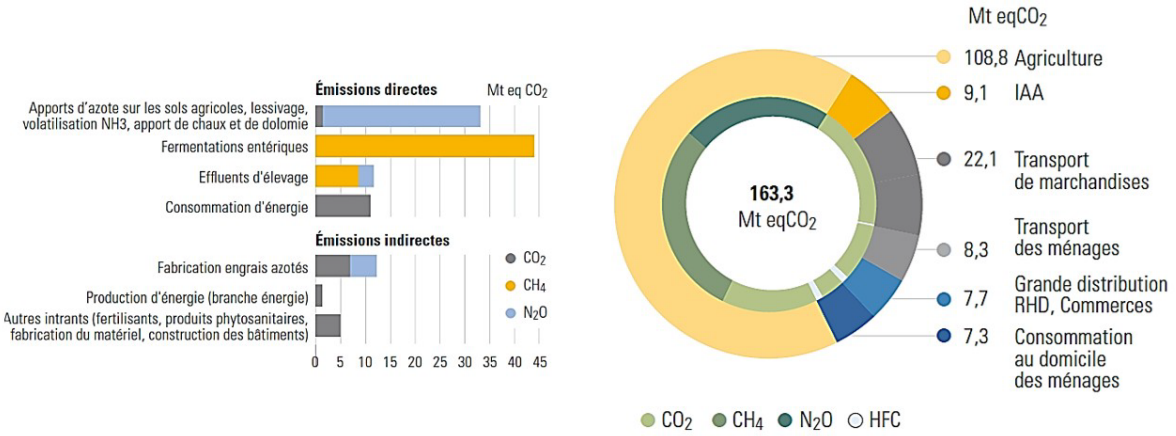
Figure 2 : (a) Emission de GES hors puits de carbone et budget carbone, Mt CO_2eq (CITEPA, 2024) (b) Empreinte carbone de la France de 1995 à 2002, Mt CO_2eq, (SNBC, 2024).

Les émissions de GES du territoire national sont calculées par le CITEPA (https://www.citepa.org/fr/presentation/) qui mobilise les méthodologies internationales de calcul, la base de données très complète est actualisée tous les ans. Ainsi, il apparaît que ces émissions diminuent régulièrement et sont même en dessous de la trajectoire proposée dans la SNBC-2 avec une réduction des émissions de – 36 % entre 1990 et 2023 (CITEPA, 2024, **Figure 2** (a)). L'empreinte carbone (sur la période 1995-2022, **Figure 2** (b)) a, quant à elle, seulement diminué de – 8 % montrant que la baisse des GES sur le territoire national s'est accompagnée d'une forte hausse du carbone importé. Ce résultat souligne aussi l'importance d'utiliser les indicateurs les mieux adaptés.

2. L'agriculture et l'agro-alimentaire, des secteurs fortement émissifs et très atypiques

Le secteur de l'agriculture et de l'agro-alimentaire représente 24 % de l'empreinte globale France et apparait très atypique quant à la répartition des gaz impliqués dans ses émissions. En effet, les 3 gaz principalement responsables du bilan final de cette empreinte carbone sont : le dioxyde de carbone CO_2, le protoxyde d'azote N_2O et le méthane CH_4. Il est important de noter que pour les deux derniers gaz, leur pouvoir de réchauffement global à 100 ans (PRG100) sont respectivement 265 fois et 28 fois plus important de le CO_2. Pour ces gaz, même de faibles émissions entraînent une conséquence importante sur le réchauffement climatique.

Le N_2O est principalement émis lors de l'épandage des engrais azotés minéraux et organiques sur les sols agricoles et durant le cycle de l'azote. Le CH_4 est quant à lui essentiellement issu de la fermentation entérique des ruminants et le stockage des effluents d'élevages. Le CO_2 provient surtout de la consommation énergétique du secteur agricole, des industries agro-alimentaires et des Grandes et Moyennes Surfaces (travail du sol, transport de marchandise, transformations…) (**Figure 3** (a)).



(a) (b)

Figure 3 : (a) Empreinte GES du secteur agricole et agro-alimentaire, (en Mt CO_2eq ; (b) Emissions territoriales de GES de l'agriculture - (moyenne 2008-2013) en émissions directes et indirectes, (Barbier *et al.*, 2019).

La production agricole est le premier poste d'émissions de GES du secteur avec 109 Mt CO_2eq (Figure 4), soit près des deux tiers de l'empreinte carbone totale. Le méthane (CH_4) pèse pour 29 % de ce bilan total et 44 % des émissions de la production agricole. Le protoxyde d'azote (N_2O) représente 23 % du bilan carbone total, et 34 % des émissions agricoles. Le CO_2 complète le bilan avec plus de 40 % du bilan carbone total mais uniquement 22 % du secteur agricole. Pour le secteur agricole, une part significative des émissions sont indirectes en particulier via la synthèse des engrais minéraux azotés (**Figure 3** (a)).

Une particularité forte est à noter sur le N_2O et le CH_4, avec un secteur de l'agriculture qui compte pour 86 % des émissions de N_2O totale tous secteurs économiques confondus, 71 % pour le CH_4 et moins de 5 % pour le CO_2 (CITEPA, 2024).

A partir de ces observations, il est important de pointer que la décarbonation du secteur de l'agriculture et de l'agroalimentaire passera comme pour tous les secteurs par des efforts sur l'abaissement des émissions de CO_2 mais aussi par des actions significatives sur le CH_4 et le N_2O, peu ciblés encore actuellement.

Un autre élément rend encore plus spécifique l'agriculture. Le secteur appelé « Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie », dit UTCATF, qui permet de rapporter les flux de CO_2 entre différents réservoirs terrestres (biomasse, sols, etc.) et l'atmosphère sur les surfaces gérées d'un territoire. Il peut ainsi constituer une source nette ou un puits net de CO_2. En particulier, le changement d'usage des terres influe sur les flux et permet dans certains cas de montrer une capacité à stocker une partie des émissions par ces sols. C'est notamment le cas par exemple lors d'un passage d'un sol agricole en culture vers un sol en prairies permanentes.

C'est pourquoi, nous allons dans cet article nous focaliser uniquement sur la décarbonation du secteur de l'agriculture qui nécessite une réflexion spécifique en particulier par le caractère atypique des gaz concernés. La décarbonation du secteur de l'agro-alimentaire passera principalement par l'optimisation des processus industriels et des transports associés, ce qui n'est pas le sujet principal de cet article.

3. Quelles évolutions des émissions pour le secteur de l'agriculture depuis 1990

Entre 1990 et 2017, les émissions du secteur de l'agriculture/sylviculture ont été quasiment stables, une baisse significative est observée à partir de 2018 avec une accélération entre 2020 et 2024 (**Figure 4**). Les raisons de cette baisse sont multiples mais la raison principale est la décapitalisation du cheptel bovin (allaitant et laitier, avec près d'un million de femelles perdues) qui s'est accélérée ces 4 dernières années (Figure 4b).

Pour l'agriculture, la SNBC-2 annone une réduction des émissions en 2030 de - 18 % par rapport à 2015, puis de - 46 % en 2050. Cela implique une accélération par rapport au passé : - 1,3 % par an environ seront nécessaires sur la période 2020-2030 soit le double des - 0,6 % par an observés sur la période 2010-2020. La pente actuelle (2020-2023), consécutive à la décapitalisation, fait que les objectifs de la SNBC-2 pour le secteur de l'agriculture sont pour l'instant respectés (**Figure 5**).

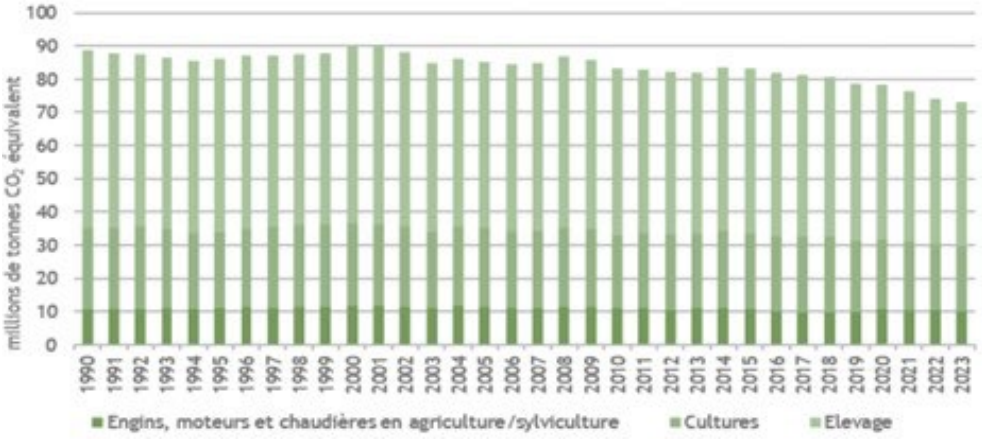


Figure 4 (a) : Répartition des émissions de CO_2eq du secteur de l'agriculture/sylviculture en France, Métropole et Outre-mer UE (CITEPA, 2024).

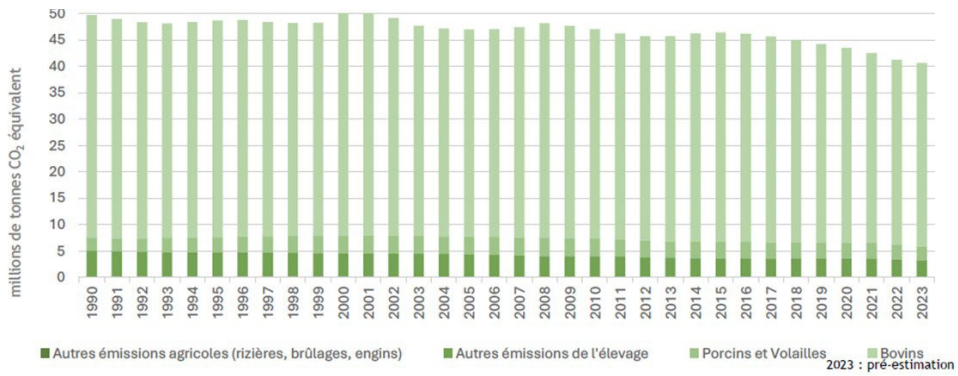


Figure 4 (b) : Répartition des émissions de CH_4 du secteur de l'agriculture / sylviculture en France, Métropole et Outre-mer UE (CITEPA, 2024).

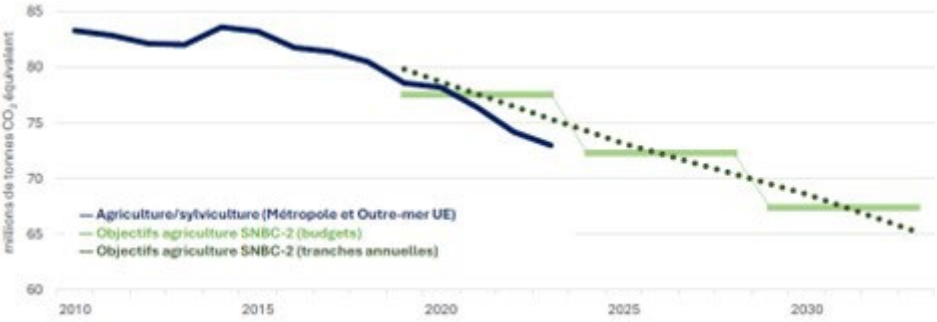


Figure 5 : Émissions de GES du secteur de l'agriculture/sylviculture et objectifs SNBC-2 (CITEPA, 2024).

4. Quelle(s) stratégie(s) pour la décarbonation du secteur de l'agriculture ?

La question de la décarbonation du secteur de l'agriculture est singulière car ce n'est pas le CO_2 qui est le principal responsable des émissions du secteurs (22 % des émissions totales du secteur, Figure 3(a)). La politique de décarbonation doit passer par des actions fortes sur le CH_4 et le N_2O mais aussi intégrer la question des puits de carbone. Pour cela, plusieurs stratégies peuvent être mobilisées et se résument ici en deux grandes stratégies mises en place sur le terrain. La première stratégie correspond à une décarbonation qui vise un maintien de la production actuelle et s'appuie sur de nombreux leviers agronomiques, zootechniques et d'innovations technologiques. Cette stratégie ne repense pas d'un point de vue systémique le modèle de production actuel mais se devra d'être compatible avec la SNBC-2 (et bientôt la SNBC-3). La deuxième stratégie, beaucoup plus systémique, s'appuie sur une scénarisation de la filière agricole en intégrant parfois l'aval agro-alimentaire et pouvant même être une partie d'un scénario complet tous secteurs économiques confondus. Cette approche modélise la production agricole à partir de différents jeux d'hypothèses plus ou moins complexes et systémiques. Ainsi de nombreux scénarios-prospectives sont sur la table produits par des structures publiques ou privées : SNBC-2 et SNBC-3, ADEME (4 trajectoires), Afterres 2050, France Stratégies, très récemment le Shift Project (4 trajectoires) et bien d'autres. En fonction des hypothèses posées, ils proposent des systèmes de production agricole plus ou moins modifiés, compatibles eux aussi avec les objectifs de la SNBC-2. La suite de cet article s'attachera à analyser les 2 stratégies et détaillant les hypothèses sous-jacentes et leurs conditions de réalisation.

4.1. Stratégie « Décarbonation par des leviers agronomiques-zootechniques-technologique sans modification significative de la production »

Le diagnostic sur les émissions du secteur de l'agriculture montre que les deux sources principales d'émission de GES sont : (i) les ruminants et la filière bovine en particulier (allaitante et laitière) pour le CH_4 ainsi que (ii) la production végétale pour le N_2O.

4.1.1. Méthode CAP'2ER®

Pour la production laitière bovine, en 2018, le Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière, les Chambres d'agriculture, France Conseil Elevage et l'Institut de l'élevage ont signé la Feuille de route climatique de la filière et le déploiement de la « Ferme Laitière Bas Carbone » sur l'ensemble du territoire national. Si l'ensemble des exploitations laitières françaises (un peu moins de 50 000) s'engagent dans cette démarche, c'est 10 millions de tonnes de CO_2eq qui pourront être évitées d'ici 10 ans, soit 20 % des émissions. Cette démarche collective est basée sur la méthode CAP'2ER®, développée par l'Institut de l'Elevage (IDELE).

CAP'2ER® un outil d'évaluation environnementale multicritère à l'échelle de l'exploitation, des ateliers et des produits, qui vise à évaluer les performances environnementales des exploitations et à proposer

des actions pour les améliorer avec une entrée carbone développée. De nombreux leviers zootechniques ont été identifiés pour abaisser les émissions de CO_{2eq} par litre de lait produit : âge au vêlage réduit, taux de renouvellement plus élevé, production par vache plus élevée, une ration équilibrée et moins méthanogène. Beaucoup plus récemment (fin 2023) la méthode CAP'2ER® a été adaptée pour les exploitations de grandes cultures en partenariat avec l'institut technique agricole grandes cultures et fourrages (ARVALIS).

Les potentiels de réduction des différents leviers ont été évalués ***sans pertes de production***, ils sont présentés pour les plus significatifs dans le **Tableau 1**.

Toutefois, l'activation de l'ensemble des leviers en particulier pour la production bovine ne permettra pas d'atteindre les 46 % de décarbonation de la SNBC-2. C'est au maximum - 25 % sur les émissions totales de GES de l'élevage qu'il serait possible d'atteindre par la mobilisation de cette démarche (Dollé, 2024).

Tableau 1 : Principaux leviers de réduction des émissions de GES et d'augmentation du stockage carbone sur une exploitation agricole, retenus dans la méthode CAP'2R® (Soenen, Henaff *et al.*, 2021).

Levier de réduction des émissions de GES et d'augmentation du stockage de carbone	Indicateurs de suivi	Bovin lait	Bovin viande	Cultures fourragères ou de vente	Potentiel de réduction
Gestion du troupeau					
Amélioration conduite sanitaire	Nombre mammites, boiteries	x	x		2 à 4 %
Age au premier vêlage, longévité des vaches	UGB génisses/UGB/VL-VA	x	x		2 à 3 %
Taux de renouvellement	UGB génisses/UGB vaches	x	x		2 à 3 %
Alimentation					
Optimisation de la teneur en azote de la ration	Kg MAT	x	x		2 à 4 %
Ajout de lipides dans la ration	Taux de lipides	x	x		3 à 6 %
Tourteau de colza au lieu de tourteau de soja	Kg soja, Kg colza	x	x		3 à 7 %
Augmentation de l'autonomie protéique	% autonomie	x	x		2 à 3 %
Gestion des déjections animales					
Couverture des fosses effluents	Présence d'une couverture	x	x		2 à 3 %
Méthanisation des déjections	Présence d'une unité	x	x		4 à 5 %
Consommation d'engrais					
Optimisation N, P, K	Kg N, P, K			x	1 à 5 %
Implantations de légumineuses	Kg de semences			x	2 à 5 %
Gestion des surfaces cultivées					
Implantation de cultures intermédiaires	Ha de CIPAN			x	1 à 2 %
Implanter des prairies temporaires ou permanentes	Ha PT ou PP			x	2 à 3 %
Gestion des infrastructures agro écologiques					
Implanter des haies	Ml de haies			x	2 à 3 %
Agroforesterie intra-parcellaire	Ha en agroforesterie			x	2 à 3 %

4.1.2. Utilisation d'additifs

Beaucoup plus récemment, un additif alimentaire (3-nitrooxypropanol, ou 3-NOP de son nom commercial Bovaer®) est présenté comme un levier puissant d'abattement du CH_4 par les ruminants. Cette molécule de synthèse est inhibitrice de l'enzyme méthyl-coenzyme M réductase qui catalyse la dernière étape de la méthanogenèse dans le rumen productrice de méthane. En lieu et place du CH_4,

les ruminants produisent de l'H_2. De nombreux essais sur vaches laitières ont montré un abattement possible de 20 à 30 % sur les émissions entériques sans pertes de productivité et sans impact sur les autres paramètres zootechniques, les émissions entériques représentant elles même environ la moitié des émissions de GES d'un litre de lait. Les taux d'abattement semblent dépendre de la composition de la ration (teneur en amidon et teneur en NDF) et des travaux récents (Van Gastelen, Burgers *et al.*, 2024) semblent montrer que l'action du 3-NOP, même si elle reste toujours efficace, peut diminuer dans certaines conditions avec le stade de lactation. Le produit a été approuvé par l'Agence Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA, 2021) et par la Food and Drug Administration en 2024. Des opérateurs laitiers français ont déjà décidé d'implémenter l'utilisation du Bovaer® comme levier de réduction des émissions. Ainsi et par exemple, le Groupe Bel et l'Association de Producteurs Bel de l'Ouest (APBO, 700 élevages) promeuvent l'utilisation du 3-NOP en distribuant une prime +10 €/1000 L de lait pour les exploitations qui choisiront de le déployer volontairement et ce dès le second semestre 2024.

4.1.3. Diminution des émissions directes de N_20 et de NH_3

Dans la même logique, l'abattement des émissions de N_2O en production végétale étant un enjeu important, plusieurs composés sont proposés actuellement comme retardateur/inhibiteur de la nitrification de l'azote dans la parcelle en ralentissant l'action des microorganismes oxydant l'ammonium en nitrite présentes dans les sols. Il est annoncé par les fabricants que l'usage de ce type de molécules induit une amélioration du Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU), une réduction du lessivage et une diminution des émissions de N_2O. L'utilisation de ces produits est recommandée lors des épandages d'effluents organiques et de digestats issus de la méthanisation. Il est proposé aussi d'intervenir sur la fonction de réduction de N_2O en N_2 dans les sols en agissant sur les propriétés physico-chimiques des sols via un « chaulage climatique » ou par l'introduction dans les sols de souches capables de réduire le N_2O (Hénault, 2024).

Des approches sont aussi développées pour les solutions azotées à base d'urée, qui par l'utilisation d'inhibiteurs d'uréase permettent de limiter les émissions de NH_3 et d'avoir un CAU amélioré.

4.1.4. Décarbonation de la production d'engrais minéral

D'autres pistes de décarbonation sont envisagées, notamment la décarbonation du processus industriel de synthèse de l'azote minéral, très consommateur d'énergie fossile. Ainsi certains producteurs d'azote minéral de synthèse (Yara, Fertiberia...) évoquent la production « d'azote minéral décarboné » à base d'hydrogène décarboné. En particulier, deux sortes d'hydrogène sont visées : l'hydrogène « vert » (issu de l'électrolyse de l'eau via de l'électricité renouvelable) ou l'hydrogène « bleu », issu d'un hydrogène produit à partir de ressources fossiles (méthane/charbon) avec capture et stockage du dioxyde de carbone produit par le procédé (CCS « Carbon Capture and Storage »). Ces options sont actuellement très discutées notamment sur le surcoût du produit final qui pourrait être très important mais aussi par les interrogations mêmes sur la maturité de la technologie du CCS ou encore la disponibilité suffisante d'électricité verte pour produire de l'hydrogène vert.

D'autres éléments auraient pu être évoqués : la prise en compte de l'albédo dans les calculs des émissions de l'agriculture et surtout sur l'intérêt potentiel des prairies permanentes sur ce sujet (Mischler, 2023), le développement du biochar comme outil de décarbonation à la fois pour les filières bovines par ajout dans la ration (Mingbo, Mariano *et al.*, 2024) ou la filière grandes cultures par le stockage carbone dans les sols, les essais actuels en cours à l'Université de Californie de modification génétique par l'outil CRISPR/Cas9 du microbiote du rumen (Khan, Ali *et al.*, 2024). Existent aussi les débats houleux sur la prise en compte de la bonne métrique pour traduire l'impact du CH_4 sur le réchauffement climatique (PRG100 versus PRG*), (De Pertuis, Couturier *et al.*, 2024).

Très récemment **The Shift Project, (**2024b) a publié un rapport sur « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère ». Un panorama des innovations technologiques en agriculture est présenté et pour certaines une matrice d'enjeux (Forces, Faiblesses, Opportunités,

Menaces) est réalisée, en particulier pour les nouvelles technologies génomiques et les nouvelles technologies d'optimisation des apports azotés. Ce rapport ne chiffre pas les effets de ces innovations sur la décarbonation mais interroge la pertinence de leurs mises en œuvre ainsi que leur appropriation par le secteur agricole. Il est rappelé dans ce rapport que contrairement à ce qui est couramment affirmé « *les technologies agricoles ne sont pas neutres, elle s'inscrivent dans un régime socio-technique déjà établi* » et « *La propension de nos sociétés à vouloir contrôler et simplifier les productions agricoles en s'abstrayant de la complexité du vivant nous amène parfois à privilégier l'usage de la technologie à système constant plutôt que de repenser le système à l'aune des enjeux qui s'imposent à lui* ».

4.1.5. La question des puits de carbone en agriculture : une évolution récente qui complique la situation (secteur UTCAFT)

L'ensemble des projections sur les bilans finaux en GES s'appuie sur le bilan entre les émissions totales de GES d'un secteur et les puits de carbone de ce même secteur pour arriver à l'émission ou empreinte carbone nette (en fonction du périmètre envisagé). Pour le secteur agricole, le puit de carbone principal identifié correspond au stockage de carbone dans les prairies permanentes (PP). Près d'un tiers de la surface agricole utile en France métropolitaine est composé de PP. Le CITEPA en 2024 a revu ses hypothèses sur le flux de carbone stocké par les PP. De l'ordre de 5 à 15 millions de Tonnes CO_{2eq}/an entre 1990 et 2020 (**Figure 6**), dans son nouveau rapport de 2024, il a plus que divisé par 5 le flux de CO_2 stocké par les PP (calcul fait en équivalent [CO_2] et pas en [C]) et a revu l'ensemble de ses calculs sur la période 1990-2023. Si on se réfère aux émissions totales du secteur agricole (entre 70 et 80 millions de tonnes CO_{2eq}), les PP dans les anciennes projections permettaient d'abattre près de 15 % des GES du secteur. Avec les nouvelles hypothèses, c'est moins de 3 % des émissions du secteur qui sont compensées (

Figure 7).

Cette nouvelle modélisation revue à la baisse de la capture du CO_2 des PP va obliger une modification significative de la stratégie de certains opérateurs économiques qui avaient intégré ce stockage comme un des leviers majeurs de leur décarbonation. Il est important d'ajouter que si, en termes de flux, les modélisations sont considérablement modifiées, en termes de stocks de carbone, les PP restent néanmoins des puits de carbone considérables à préserver. Le retournement des PP, significatif ces dernières années, induit une libération rapide sur quelques années du carbone stocké depuis près d'un demi-siècle.

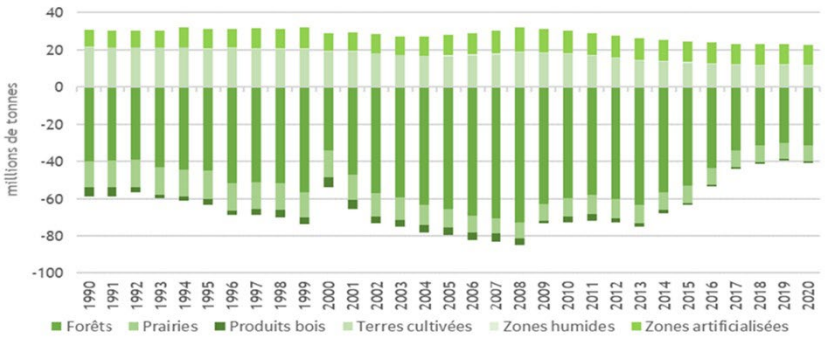


Figure 6 : Répartition des émissions et absorption de CO_2 du secteur de l'UTCAFT en France (métropole et Outre-mer UE), Période 1990-2020, anciennes hypothèses de flux de stockage carbone (CITEPA, 2024).

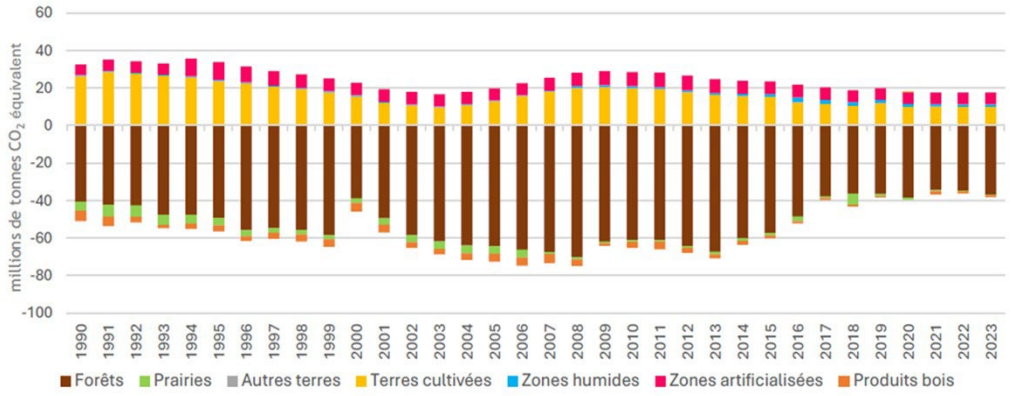


Figure 7 : Répartition des émissions et absorption de CO_2 du secteur de l'UTCAFT en France (métropole et Outre-mer UE), Période 1990-2023, nouvelles hypothèses de flux de stockage carbone (CITEPA, 2024).

4.2. Stratégie de décarbonation de l'agriculture par scénarisation

Comme déjà évoqué, de nombreux scénarios-prospectives sont disponibles, ils ont été produits par des Agences (ADEME), en interministériel (SNBC), ou par des cabinets d'étude privés (Solagro, Shift Project). Leur comparaison est particulièrement difficile car de nombreux paramètres les rendent singuliers à la fois dans les méthodes retenues pour l'évaluation de la production de la biomasse, l'intégration ou non de paris technologiques ou les évolutions de ruptures quant aux comportements sur la mise en œuvre d'une vraie sobriété. Beaucoup de ces scénarios ont aussi pris le parti d'intégrer une production énergétique significative à partir de la biomasse agricole en particulier par la production de biométhane par méthanisation ou d'agrocarburants (dite biomasse liquide). L'agrivoltaïsme, encore très récent, n'est que très peu abordé dans les scénarios actuels.

4.2.1. Scénarios ADEME 2050 : Échelle française, 4 scénarios sont proposés (ADEME, 2021)

4 trajectoires (S1 à S4) sont proposées reposant sur une radicalité décroissante dans la sobriété, l'usage des ressources et la consommation de viande, avec des paris technologiques de plus en plus poussés à mesure que les exigences de sobriété diminuent :

- **S1 : Génération frugale** : carte carbone individuelle, division par 3 de la consommation de viande, 70 % des surfaces agricoles en agriculture biologique (AB) ;
- **S2 : Coopération territoriale** : division par 2 de la consommation de viande, 50 % des surfaces agricoles en AB ; pas de pari technologique, une fiscalité environnementale forte ;
- **S3 : Croissance verte** : - 30 % de consommation de viande, 30 % des surfaces en AB ; des paris technologiques mesurés, le marché comme régulateur ;
- **S4 : Pari réparateur** : très peu de contraintes, la technologie comme référence : maintien de la consommation de viande et productions de protéines de synthèse, de nombreux paris technologiques dont le CCS obligatoire comme base du scénario, intelligence artificielle, planification centralisée du système énergétique.

4.2.2. Afterres 2050 produit par SOLAGRO : Échelle française (Solagro, 2016)

Basé sur une division par 2 de la consommation de viande et plus de 40 % de surfaces agricoles en AB, les autres surfaces étant dites intégrées (semis direct, couverts végétaux…), le scénario Afterres 2050 est basé sur une hiérarchisation des usages de la biomasse, à savoir du plus au moins prioritaire : alimentation humaine (avec import/export possible sur certains produits) puis alimentation animale (avec une baisse de 50 % des cheptels ruminants et de 30 % des monogastriques) et, enfin, un usage

de la biomasse encore disponible pour des usages non-alimentaires et la production d'énergie renouvelable, en particulier via le développement de la méthanisation. Ce scénario permet de garantir, sans rupture technologique, une alimentation saine et durable, tout en produisant de l'énergie renouvelable à travers le développement d'une méthanisation durable. Ce scénario correspond à la partie agricole et agro-alimentaire du scénario Négawatt.

Dans un rapport très récent (Solagro, 2024) basé sur les hypothèses d'Afterres 2050, Solagro précise les gisements de biomasses disponibles pour la transition énergétique. Dans ce document, les agrocarburants ne sont plus considérés comme une voie significative, en revanche la production de biométhane par méthanisation dépasse les 130 TWh en 2050 (pour une consommation finale en gaz renouvelables entre 200 et 300 TWh dans les scénarios actuels pour 2050). Les intrants retenus, par ordre d'importance décroissante, sont : les CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique), les résidus de culture, l'herbe des prairies permanentes et les effluents d'élevage.

4.2.3. Scénario du (The Shift Project, 2024a) : échelle française, 4 scénarios sont proposés

Les 4 scénarios respectent les 48 $MtCO_{2eq}$, limite fixée pour le secteur agricole dans la SNBC-2 2050 (émissions directes seulement). Chaque scénario développe sa propre logique et le 4e est une tentative de conciliation des enjeux des 3 premiers.

- **S1 : Autonomie** : priorité à une meilleure autonomie agricole *et al*imentaire nationale, Les principales hypothèses pour l'élevage sont - 35 % pour le cheptel bovin, maintien des cheptels petits ruminants et monogastriques (avec montée en gamme de la production de l'ensemble des monogastriques) ;
- **S2 : Bioénergie** : priorité à une meilleure indépendance énergétique nationale (mobilité rurale, carburant renouvelable pour l'aviation…), après sécurisation des usages alimentaires nationaux. Les principales hypothèses pour l'élevage sont - 35 % pour le cheptel bovin, - 30 % pour les cheptels petits ruminants et monogastriques (avec montée en gamme de la production de l'ensemble des monogastriques),
- **S3 : Export** : priorité à la contribution à la sécurité alimentaire internationale par le maintien d'une capacité exportatrice française (céréales et oléo-protéagineux) après sécurisation des usages alimentaires nationaux et donc assurer un rôle géostratégique à la France. Les principales hypothèses pour l'élevage sont - 35 % pour le cheptel bovin, - 30 % pour les cheptels petits ruminants et monogastriques (avec montée en gamme de la production de l'ensemble des monogastriques) ;
- **S4 : Conciliation** : compromis entre les différentes priorités stratégiques contrastées données aux S1, S2 et S3. Ce scénario est construit de façon à concilier en premier lieu les objectifs physiques poursuivis (production, énergie, climat), avec une priorité particulière donnée à la résilience. Les principales hypothèses pour l'élevage sont - 30 % pour le cheptel bovin laitier, - 30 % pour le cheptel allaitant et - 20 % pour les petits ruminants et monogastriques (avec montée en gamme de la production de l'ensemble des monogastriques).

4.2.4. Scénario AMS (avec Mesures Supplémentaires) pour la construction de la SNBC-3 (Direction Générale de l'Energie et du Climat. 2024, Projet de Stratégie Nationale Bas Carbone, 2024)

Ce scénario est le scénario central de la SNBC, il vise à décrire une trajectoire de réduction des émissions de GES. Les hypothèses sont obtenues à partir d'hypothèses macro-économiques et sectorielles. Elles ont été co-construites en inter-administrations avec le Secrétariat Général à la Planification Ecologique en 2023 et révisées en 2024 pour la mise en consultation de la SNBC-3. Pour la partie élevage, il conduit à une diminution de cheptel bovin d'environ - 30 %.

L'ensemble des scénarios présentés, quelques soient les options proposées, développent une entrée « Production d'Energie » très significative (

Tableau 2). Que ce soit pour la biomasse liquide (pour produire des « agrocarburants ») ou pour la biomasse gaz pour produire du biométhane, la pression sur la biomasse agricole pour la production d'énergie va s'accentuer de manière particulièrement forte. Avec une situation 2020 avec 24 MtMS pour 45 TWh, elle devrait évoluer *a minima* à 54 MtMS pour 108 TWh pour le scénario Export du Shift-Project et au maximum à 143 MtMS et 285 TWh pour le scénario Bioénergies du Shift-Project. Au sein de chaque scénario, on trouve aussi des arbitrages très différents entre Biomasse liquide et Biomasse gaz. Par exemple le scénario Afterres 2050, limite très fortement la production de biomasse liquide (14 TWh) au profit de la biomasse gaz (124 TWh), Le scénario Bioénergie du Shift Project quant à lui maximise les deux (182 TWh pour la biomasse liquide et 103 TWh pour la biomasse gaz). Pour permettre cette production énergétique, l'ensemble des scénarios indiquent une baisse forte à très forte du cheptel ruminant bovin (au minimum 30 % pour le Shift Project à plus de 50 % pour le scénario Afterres 2050), diminution du cheptel nécessaire, selon les scénarios, pour garantir la baisse des émissions nécessaires du secteur agricole. Cette baisse du cheptel bovin libère des surfaces agricoles, en particulier les fourrages des prairies permanentes qui pourront être aussi des éléments significatifs dans la production de biométhane. Cela permettrait aussi un maintien de ces prairies permanentes qui risqueraient d'être retournées faute de valorisation en pâturage. La baisse du cheptel monogastrique est aussi significative (- 20 à - 30 %), non pas à cause des émissions de GES, car les monogastriques sont peu concernés mais plutôt sur la compétition pour les céréales entre alimentation humaine et animale.

Tableau 2 : Projections à 2050 de différents scénarios pour l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques (CGAAER, CGE, IGEDD, 2024 et The Shift Project, 2024)

	Biomasse liquide		Biomasse Gaz		Biomasse totale "agricole"	
	MtMS	TWh	MtMS	TWh	MtMS	TWh
Situation 2020	20	36	4	9	24	45
Afterres 2050	7	14	62	124-157	69	138
ADEME S1-Frugalité	22	44	54	109	76	153
ADEME S2-Coopération	26	51	55	111	81	162
ADEME S3-Croissance verte	53	107	84	168	137	275
ADEME S4-Pari technologique	57	113	74	148	131	261
Shift Project S1-Autonomie	*23**	45	*43**	86	66	131
Shift Project S2-Bioénergies	*91**	182	*52**	103	143	285
Shift Project S3-Export	*14**	28	*40**	80	54	108
Shift Project S4-Conciliation	*29**	58	*43**	86	72	144
SNBC-3 AMS	45	90	50	99	95	189

** évaluation par les auteurs pour permettre une comparaison inter-scénarios*

Les scénarios décrits précédemment indiquent une possibilité de production d'énergie primaire de plus de 100 TWh jusqu'à 285 TWh d'ici 2050 à partir de biomasse. Ceci implique une multiplication par plus de 6 à 10 de l'énergie produite par rapport à aujourd'hui. Cela ne pourra pas se réaliser sans accroître très significativement le prélèvement actuel sur les gisements de biomasse ni augmenter les prélèvements des résidus de cultures, ni recourir à certaines cultures dédiées et développer massivement les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE). Cependant, le potentiel de ces leviers reste incertain car leur application, en particulier la diminution de la consommation des protéines animales, aurait un impact négatif sur les filières d'élevage, qui, pour l'instant, ne semblent pas avoir intégré ces arbitrages dans leurs prospectives. Par ailleurs, quel que soit le chemin qui sera emprunté,

une approche systémique est requise pour garantir une production de biomasse dans le cadre des principes de l'agroécologie (conservation de la fertilité des sols en particulier) en préservant la biodiversité et la qualité de l'eau ainsi qu'en améliorant la capacité à stocker du carbone dans les sols agricoles.

Ainsi, l'arbitrage de l'usage de la biomasse sera le premier critère pour atteindre les objectifs affichés. Une planification et une régulation semblent nécessaires pour que le marché ne soit pas le seul critère d'évolution des usages de la biomasse, et plus précisément de la filière méthanisation. Sans régulation, des effets d'aubaine sont possibles et une non-prise en compte des externalités négatives induites par un développement massif non régulé fort probable. La réglementation devra aussi se pencher sur la question de l'évolution des pratiques agronomiques, en encourageant les plus vertueuses.

Pour la méthanisation, la recherche et le développement sont aussi conviés pour mettre l'unité de méthanisation au cœur des nouveaux itinéraires techniques agronomiques. Le dernier enjeu, et pas des moindres, sera la capacité d'appropriation de la société civile de ce développement massif. À ce jour, avec seulement 1600 unités de méthanisation en fonctionnement sur le territoire français, dont 720 en injection (source GRDF au 28/11/2024), des tensions sont déjà perceptibles. Les annonces très récentes des opérateurs gaziers confirmées par la consultation actuelle sur la SNBC-3 et PPE-3 quant à une multiplication par 4 d'ici 2030 puis par 10 des volumes injectés de biométhane dans les réseaux (13 TWh en 2024, 49 TWh en 2030 et 130 TWh en 20505) interrogent. Ainsi des questionnements se font jour sur la compétition des usages de la biomasse, la qualité de l'eau, des projets d'unités démesurées et d'autres objets de mécontentement témoignent de l'inquiétude actuelle. Comment alors développer la méthanisation sans renforcer ces tensions ? Car ce sont entre 5 000 et 7 000 nouvelles unités de méthanisation qu'il faudra installer pour atteindre les objectifs envisagés dans les différents scénarios.

5. Conclusion

La décarbonation du secteur agricole est un enjeu majeur. Nous avons montré que plusieurs stratégies, non-exhaustives, pouvaient être mises en œuvre. En premier lieu à partir de choix basés sur une stabilisation globale de la production agricole et de maintien de l'élevage en particulier, la baisse des émissions de GES passe par l'activation de leviers agronomiques, zootechniques et d'innovations technologiques plus ou moins mâtures et avec une acceptabilité sociale et des surcoûts encore à valider. Il apparaît que cette baisse, avec tous les leviers activés ne devrait pas permettre d'atteindre les objectifs de division par 2 des émissions de GES. En deuxième lieu, les scénarios détaillés, qui par construction permettent, d'atteindre les objectifs de la SBNC sont basés sur des hypothèses en partie communes : une production d'énergie par le secteur agricole importante à très importante et une baisse du cheptel ruminant forte à très forte. Certains des scénarios ou des options proposées sont basés sur des évolutions de rupture en particulier sur une vraie sobriété des usages et une baisse très significative de la consommation de produits animaux en particulier. Le secteur agricole n'échappera pas à une vraie réflexion systémique car il ne pourra pas repousser la mise en œuvre de sa décarbonation via les leviers identifiés et/ou la mise en œuvre de tout ou partie des scénarios proposés. La question des lieux mais aussi des acteurs à convier pour débattre et arbitrer est posée. Pour les auteurs de cet article, il apparaît très difficile de répondre à l'ensemble des enjeux identifiés : décarbonation, maintien de la production agricoles et de l'élevage en particulier, production énergétique significative, politique exportatrice massive, autonomie alimentaire, le tout dans le respect d'une véritable agroécologie. Des choix forts sont à faire.

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

Yves LE ROUX : https://orcid.org/0000-0001-6819-9114

Guillaume HENRY : https://orcid.org/0009-0003-0672-5934

Rôle des auteurs

Yves LE ROUX : rédaction, relecture. Guillaume HENRY : relecture, rédaction, mise en page.

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.

Références bibliographiques

ADEME. 2021. Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat. 687p

Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J-M, Sylvestre M., PharabodI., 2019. L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France. Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Paris, IDDRI, Janvier 2019. 24p.

CITEPA, 2024. Rapport Secten – Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023.

Commission européenne. 2024. Le Pacte Vert pour le Climat (https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr)

De Pertuis C., Couturier C. Szopa S. 2024. Le méthane dans les stratégies d'atténuation : un enjeu majeur : à la recherche des bonnes équivalences climatiques entre CO2 et méthane. La fabrique écologique. N°48.

Direction Générale de l'Energie et du Climat. 2024. Synthèse du Scénario avec Mesures Existantes. 204p

Dollé JB. 2024 La réduction des émissions de méthane par la transformation des systèmes agricoles. IDELE. Carrefours de l'Innovation Agronomique, 19/09/2024 – Bordeaux Science Agro.

EFSA. 2021. Safety and efficacy of a feed additive consisting of 3-nitrooxypropanol (Bovaer® 10) for ruminants for milk production and reproduction (DSM Nutritional Products Ltd). EFSA Journal 2021;19(11):6905.

Hénault C. 2024. Diminuer les émissions de gaz à effet de serre par les sols en intervenant sur la fonction de réduction de N_2O en N_2. INRAe. Carrefours de l'Innovation Agronomique, 19/09/2024 – Bordeaux Science Agro.

Khan FA, Ali A, Wu D, Huang C, Zulfiqar H, Ali M, Ahmed B, Yousaf MR, Putri EM, Negara W, Imran M, Pandupuspitasari NS. 2024. Editing microbes to mitigate enteric methane emissions in livestock. World J Microbiol Biotechnol. 13;40(10):300. doi: 10.1007/s11274-024-04103-x. PMID: 39134917.

Mischler P., CASDAR "Albedo Prairies" 2023., Idele. https://afpf-asso.fr/projet/diaporamas-du-seminaire-de-restitution-du-projet-albedo

Mingbo Ni, Mariano C. Parra, Alex V. Chaves, Sarah J. Meale. 2024. Effect of enriched biochar on methane emissions, rumen microbial structure and rumen fermentation characteristics in Holstein steers, Livestock Science, Volume 289, https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105590.

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. 2020. Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). 192p

Projet de Stratégie Nationale Bas Carbone, 2024, Première grandes orientations à l'horizon 2030 et enjeux à l'horizon 2050. Novembre 2024, 160p.

Rapport du CGAAER, CGE, IGEDD. 2024. Évaluation du potentiel de production d'énergies renouvelables à partir de la biomasse agricole et forestière française à l'horizon 2050. Novembre 2024. 158p.

Soenen B., Henaff M., Lagrange H., Lanckriet E., Schneider A., Duval R., Streibig J.L., 2021. Méthode Label Bas-Carbone Grandes Cultures (version 1.0). 133p.

Solagro. 2016. Scénario Afterres 2050, version 2016. 96p

Solagro. 2024. Quelles biomasses pour la transition énergétiques. Septembre 2024. 36p.

The Shift Project. 2024a. Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère, Rapport final. Novembre 2024. 251p.

The Shift Project. 2024b. Quelles technologies pour une agriculture bas carbone résiliente et prospère. Rapport final. Novembre 2024. 83p.

Van Gastelen, S. Burgers E., Dijkstra J., de Mol R., Muizelaar W., Walker N., Bannink A. 2024. Long-term effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission and milk production characteristics in Holstein-Friesian dairy cows. Journal of Dairy Science, Volume 107, Issue 8, 5556 – 5573

Pour citer cet article : Yves Le Roux, Guillaume Henry. Contribution des secteurs agricole et agroalimentaire à la neutralité carbone française : scénarios prospectifs et trajectoires potentielles. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.1-14. 10.17180/ciag-2025-vol102-art01

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.

Diminuer les émissions de gaz à effet de serre par les sols en réduisant N_2O en N_2

Catherine HENAULT[1], Mohamed ALKASSEM-ALOSMAN[1], Mustapha ARKOUN[2], Elodie BARBIER[1], Adeline BESNAULT[3], Florian BIZOUARD[1], Hocine BOURENNANE[3], Virginie BOURION[1], Henri BREFORT[1], Thomas EGLIN[4], Guillaume GUYERDET[1,5], Alain HARTMANN[1], Cécile LE GALL[6], Cécile REVELLIN[1], Nicolas SABY[3], Camille ROUSSET[1,7]

[1] Institut Agro, INRAE, Université Bourgogne, Université Bourgogne Franche-Comté, Agroécologie, Dijon, France

[2] Laboratoire de Nutrition Végétale, Centre Mondial de l'Innovation – ROULLIER, Saint-Malo, France

[3] INRAE, Info&Sols, 45075, Orléans, France

[4] ADEME, Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables, Service Planification Energétique Prospective Impacts et Territoires, F-49000, Angers, France

[5] INRAE Le Rheu - 66 route du Bois de la Motte - La Motte au Vicomte - 35653 Le Rheu Cedex

[6] TERRES INOVIA, Avenue Lucien Brétignières, 78850, Thiverval Grignon, France

[7] Integrative Agroecology Group, Research Division Agroecology & Environment, Agroscope, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Switzerland

Correspondance : catherine.henault@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art02

Résumé

Les concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre (GES) (CO_2, dioxyde de carbone, CH_4, méthane et N_2O, oxyde nitreux) sont actuellement à des niveaux jamais atteints et continuent d'augmenter de manière fulgurante depuis l'industrialisation. Les sols agricoles étant la principale source de N_2O, caractérisé par son très fort pouvoir de réchauffement global, nous cherchons à développer des solutions biotechniques pour diminuer les émissions de ce gaz par les sols. Nos travaux permettent de présenter des chroniques d'abattement des émissions de N2O par les sols grâce à l'application de deux leviers utilisables par toutes les formes d'agriculture, le chaulage climatique (apport de produits chaulant sur un sol acide pour atteindre un pH de 6.8) et l'inoculation de légumineuses avec des souches de rhizobia possédant les gènes nosZ+. Ces leviers sont issus d'études préalables que nous avons conduites dans le but de stimuler la réduction de N2O en N2 dans les sols. Chemin faisant, nos travaux sur le chaulage climatique ouvrent aussi des perspectives sur l'atténuation des émissions de CO2 par les sols pour lesquelles des recherches sur les mécanismes sous-jacents, sur les facteurs environnementaux d'influence et sur la généricité des résultats actuels sont requises.

Mots-clés : sols agricoles, atténuation des émissions de gaz à effet de serre, N_2O réductase, pH, chaulage, inoculation des légumineuses

Abstract: Mitigation of Greenhouse Gas Emissions from Soils by Enhancing the N_2O to N_2 Reduction Pathway

The mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, particularly nitrous oxide (N_2O) from agricultural soils, is crucial given the unprecedented atmospheric concentrations of GHGs such as carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and N_2O, which continue to rise rapidly since industrialization. Agricultural soils represent a major source of N_2O, a potent greenhouse gas with a significant global warming potential. Over time, we explore the evolution and application of biotechnical strategies aimed at mitigating N_2O

emissions in soils. Here, we presented two key mitigation approaches, which are: (1) climatic liming which involves liming addition to attain soil pH of 6.8, and (2) inoculation of legumes with rhizobial strains harboring *nosZ* genes, known to encode for N_2O reductase. These approaches were based on prior research conducted to demonstrate their respective efficacy in stimulating N_2O conversion to N_2 in soil. Additionally, our findings from climatic liming suggested its potential to mitigate soil CO_2 emissions. Nevertheless, further researchs are required to understand the underlying mechanisms, environmental determinants, and broader applicability of this approach to mitigate soil CO_2 emissions.

Keywords: agricultural soils, greenhouse gas mitigation, N_2O reductase, pH, liming, inoculation of legumes

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

Les résultats des mesures des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre (CO_2, dioxyde de carbone, CH_4, méthane et N_2O, oxyde nitreux) mis à disposition par le programme NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration - https://www.co2.earth/co2-ice-core-data) montrent que celles-ci sont actuellement à des niveaux jamais atteints et qu'elles continuent d'augmenter de manière fulgurante depuis l'industrialisation. Les sols agricoles étant la principale source de N_2O, caractérisé par son très fort pouvoir de réchauffement global (https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values %20 %28August %202024 %29.pdf), nous cherchons à développer des solutions biotechniques pour diminuer les émissions de ce gaz par les sols.

1.2. Cahier des charges, bases de la réflexion et angle d'attaque des émissions de N_2O

Concernant ces solutions biotechniques, le cahier des charges que nous nous sommes définis considère trois points principaux. (i) Ces solutions ne doivent pas engendrer de transfert de pollution ou de nouvelles pollutions. (ii) On doit être en capacité de quantifier spécifiquement les bénéfices qu'elles apportent et (iii) elles doivent être en cohérence avec la dynamique de l'écosystème agricole.

Parmi l'ensemble de la littérature sur le sujet, nous pouvons mettre en avant trois documents sur lesquels nous nous sommes appuyés pour identifier et concevoir nos stratégies d'action. (i) Le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) propose plusieurs pistes pour réduire les émissions de N_2O par les sols, principalement basées sur l'amélioration de l'efficience de l'azote apporté dans les systèmes de culture en intervenant sur la gestion des cultures et la fertilisation azotée (forme des fertilisants, conditions d'application, …), (Smith *et al.*, 2014). (ii) Butterbach-Bahl *et al.*, (2013), ont proposé un schéma présentant l'ensemble des mécanismes biotiques et abiotiques impliqués dans les émissions de N_2O par les sols et (iii) Pellerin *et al.*, (2013) ont évalué le potentiel d'atténuation de différentes actions techniques pour réduire les émissions de GES par les sols sur la base d'une méthodologie incluant l'évaluation d'un potentiel d'atténuation unitaire et l'assiette potentielle de déploiement de chaque action.

Nous avons proposé une représentation simplifiée des mécanismes microbiens impliqués dans les émissions de N_2O par les sols (Figure 1). Celle-ci met en évidence (i) les processus source de N_2O, c'est à dire les premières étapes de la dénitrification et la nitrification et (ii) le rôle puits de la réduction de N_2O en N_2, dernière étape de la dénitrification, et seul mécanisme terrestre connu permettant l'élimination du gaz N_2O. La réduction de N_2O en N_2 est catalysée par l'enzyme N_2O réductase, codée par les gènes *nosZ (Pauleta et al., 2019 ; Orellana et al., 2014).*

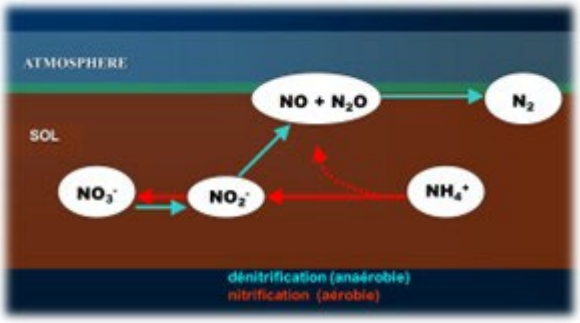


Figure 1 : Représentation simplifiée des mécanismes microbiens impliqués dans les émissions de N_2O par les sols (source : Hénault, 2004).

Afin de réduire les émissions de N_2O par les sols, nous avons choisi de stimuler l'étape de réduction de N_2O en N_2. En effet, le fonctionnement de cette dernière étape de la dénitrification (i) permet le bouclage du cycle de l'azote et ainsi la sortie de cet élément sous une forme non réactive (N_2), (ii) n'a pas d'impact direct sur la production agricole et (iii) des travaux préliminaires avaient permis d'identifier des situations agronomiques où les sols ne réduisaient pas N_2O en N_2 et fortement émettrices de N_2O. **Stimuler la réduction de N_2O en N_2 des sols est donc apparu une stratégie en cohérence avec notre cahier des charges.**

1.3. Approches retenues pour stimuler la réduction de N_2O en N_2 dans les sols

1.3.1. Introduire des microorganismes capables de réduire N_2O en N_2 (« approche MIC »)

Une première approche consiste à introduire dans le sol des microorganismes capables de réduire N_2O en N_2 (Hénault *et al.*, 2009). Pour des raisons liées à l'écologie microbienne des sols (diversité des microorganismes, équilibres entre les populations, …) et des raisons économiques (dimensionnement des inoculants), l'implantation dans les sols de groupes microbiens spécifiques présentant des intérêts agronomiques ou environnementaux, reste difficile. Néanmoins, cette difficulté est moindre dans le cas d'organismes symbiotiques avec une plante. En effet, celle-ci crée une niche écologique particulière permettant à son symbiote de se développer dans le sol. C'est le cas par exemple des Rhizobiacées, symbiotes des légumineuses qui peuvent se développer dans les sols en présence de leur plante hôte, qu'ils soient naturellement présents dans le sol ou qu'ils soient inoculés. Les gènes *nosZ* codant pour la synthèse de l'enzyme impliquée dans la réduction de N_2O en N_2 ont été observés chez certains de ces Rhizobiacées symbiotes de plantes cultivées comme *Sinorhizobium melilotti*, souche 2011, symbiote de la luzerne. Sameshima-Saito *et al.* (2006) ont démontré que des plantes de soja inoculées avec la souche *Bradyrhizobium japonicum* USDA 110, sont effectivement capables de réduire N_2O en N_2.

1.3.2. Intervenir le cas échéant sur les propriétés physico-chimiques des sols contrôlant leur capacité à réduire N_2O en N_2 (« approche PPC »)

Une seconde approche consiste à rechercher si l'activité de réduction de N_2O en N_2 des sols est contrôlée par leurs propriétés physiques et à intervenir, le cas échéant, sur ces propriétés afin d'y stimuler la réduction de N_2O en N_2. Suite à des expérimentations en laboratoire avec apport de lisier sur du sol initialement incapable de réduire N_2O en N_2 (Hénault *et al.*, 2001), nous avons envisagé que des apports de matières organiques permettraient de stimuler la réduction de N_2O en N_2 des sols (Hénault *et al.*, 2009). Par ailleurs, Le Gall *et al.*, (2015) ont proposé une ébauche de relation entre pH et capacité des sols à réduire N_2O en N_2, relation obtenue à partir des sites du projet NO GAS (https://www.rmt-fertilisationetenvironnement.org/moodle/pluginfile.php/568/mod_resource/content/0/Casdar_NO_GAS_250909.pdf).

1.3.3. Quantifier les évitements d'émission de GES à différentes échelles

Pour ces deux approches, nous accordons de l'importance à la quantification des évitements d'émission obtenus et potentiels, à différentes échelles (du micro-organisme à la région administrative) pour répondre aux attentes de différentes cibles (académique, professions agricoles, politiques publiques,

…) en considérant l'ensemble des GES, c'est-à-dire principalement N_2O et CO_2, au regard de leurs pouvoirs de réchauffement global respectifs.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Caractérisation de la capacité des sols à réduire N_2O en N_2

2.1.1 Test de laboratoire

Pour caractériser la capacité des sols à réduire N_2O en N_2, nous avons appliqué le test décrit dans la norme ISO/TS 20131-2, basé sur l'utilisation des propriétés inhibitrices de l'acétylène vis-à-vis de la réduction de N_2O en N_2. Ce test permet (i) de connaitre la capacité des sols à réduire N_2O par la mesure d'indicateurs (r_{max}) et, (ii) en étendant le concept de phénotype aux sols, de classer les sols en 3 groupes (i) PhN_2Ored^- : sols avec un r_{max} élevé, signature d'une faible capacité à réduire N_2O, (ii) PhN_2Ored^+ : sols avec un r_{max} faible, signature de sa capacité à réduire N_2O et (iii) $PhN_2Ored^{+/-}$: sols avec un r_{max} moyen, signature d'une capacité intermédiaire du sol à réduire N_2O.

2.1.2. Sols testés

90 sols du RMQS (Réseau de Mesure de la Qualité des Sols) ont été rééchantillonnés selon le protocole dédié. Ces 90 sites ont été sélectionnés en appliquant la méthodologie d'échantillonnage par hypercube latin, pour couvrir la variabilité des sols français en termes d'occupation, de répartition géographique, de teneur en carbone et de pH, du fait des résultats préliminaires présentés respectivement dans Hénault *et al.*, (2001) et Le Gall *et al.*, (2015).

2.2. Zoom sur les mesures *in situ* des émissions de GES par les sols

2.2.1. Sites expérimentaux

Les dispositifs de nos essais au champ incluent 3 blocs et plusieurs modalités dont une modalité témoin. Concernant l'approche « PPC », nous avons conduit des essais au champ (i) sur le site Arvalis de la Jaillière en Loire Atlantique, (ii) sur une parcelle agricole située à Presly la Noue dans le Cher et (iii) sur une parcelle agricole située près de Saulieu en Côte d'Or. Ces 3 sites ont en commun d'être sur des sols acides, (i) limoneux, limono-sableux pour le site de la Jaillière, (ii) sablo- limoneux pour le site de Presly la Noue et (iii) sableux pour le site de Saulieu. Concernant l'approche « MIC », l'essai au champ a été conduit sur le site INRAe situé à Ardon dans le Loiret, sur un sol sableux et acide.

2.2.2. Protocoles

Les mesures d'émission de GES *in situ* ont été réalisées en appliquant la méthode des chambres statiques (Photos 1) couplées à la chromatographie en phase gazeuse (CPG). Brièvement, des embases creuses couvrant 0.2 m² (chambres rondes) ou 0.5 m² (chambres carrées), selon la disponibilité du matériel - sont installées en permanence au sol. Elles sont enfoncées dans le sol sur environ 10 cm et dépassent celui-ci sur environ 10 cm aussi. En général, nous installons 3 chambres par parcelle élémentaire, ce qui nous permet d'avoir 9 répétitions par modalité dans les essais contenant 3 blocs. Au moment des mesures, les embases sont fermées hermétiquement par le dessus, délimitant un espace gazeux au-dessus du sol. Des couvercles plats nécessitant de couper les plantes contenues dans les embases sont utilisés dans l'approche « PPC ». Les mesures sont alors réalisées sur une durée de 2h30, de jour. Des couvercles hauts sont utilisés dans l'approche « MIC » pour préserver les plantes. Les mesures sont réalisées sur une durée de 16 h, de nuit. Dans les deux cas, des échantillons gazeux sont prélevés régulièrement pendant la fermeture des chambres. Ces échantillons sont analysés par chromatographie en phase gazeuse à l'aide d'un détecteur en capture d'électrons pour N_2O et d'un détecteur à conductivité thermique pour CO_2.



Photos 1 : Chambres au sol utilisés lors de nos mesures.

A. Embases des chambres carrées utilisées sur le site de la Jaillière avec des couvercles plats (approche « PCC »). B. Chambres fermées avec un couvercle haut pour respecter les plantes de soja sur l'essai conduit à Ardon (approche « MIC »). C et D. Chambres rondes fermées avec un couvercle plat sur le site près de Saulieu (approche « PCC »).

2.3. Caractérisation de la capacité des *rhizobia* à réduire N_2O en N_2 (approche « MIC »)

Nos travaux ont été conduits à différentes échelles, allant de la caractérisation génomique à la parcelle cultivée, en passant par des incubations en serre (Photo 2). Nous nous sommes intéressés aux symbiotes du soja, du trèfle, de l'arachide, de la fèverole, du lupin et plus récemment du pois. Nous avons travaillé avec des souches de *rhizobia* de la collection MIAE « Microorganismes d'Intérêt Agronomique et Environnemental » hébergée par l'UMR AgroEcologie de Dijon. Pour le pois, nous avons aussi réalisé de nouveaux isolements à partir d'un sol agricole. La présence des gènes *nosZ* chez les *rhizobia* étudiés a été recherchée par des techniques de biologie moléculaire (utilisation d'amorces spécifiques, séquençage, …). L'activité de réduction de N_2O a ensuite été mesurée sur des souches *nosZ*+, en cultures pures ou associées à leur plante hôte, cultivée en milieu inerte (perlite) ou sur sol en serre (Photo 2). Pour le soja, nous avons été jusqu'à la caractérisation au champ.



Photo 2 : Dispositif de mesure de l'activité de réduction de N_2O en serre.

2.4. Modification des propriétés physico-chimiques des sols (approche « PPC »)

Pour cette approche, nous avons aussi conduit des travaux à différentes échelles, du mésocosme de sol déstructuré à la parcelle cultivée. Nous avons apporté au sol de la chaux (CaO) sur les sites de la Jaillière et de Presly la Noue et du carbonate de calcium de synthèse ainsi que du carbonate de calcium ($CaCO_3$) d'origine marine (Calcimer®) sur le site de Saulieu (Photo 3). Les doses apportées ont été calculées à l'aide de l'équation proposée par Rémy and Marin Laflèche (1974), pour atteindre un pH de 6.8 (Hénault *et al.*, 2019).



Photo 3 : Apport de carbonate de calcium sur le site situé près de Saulieu.

2.5. Changement d'échelles de la parcelle cultivée à la région et de la parcelle cultivée à la France (approche PCC)

Pour le changement d'échelle de la parcelle cultivée à la Région, les équations mobilisées ont été (i) une version adaptée de l'équation Tier 1 du GIEC (Hergoualc'h *et al.*, 2019) tel que suggéré dans la méthodologie, l'adaptation permettant d'introduire le pH des sols dans le calcul, (ii) l'équation Tier 2 publiée par Stehfest et Bouwmann (2008), (iii) ainsi que l'équation proposée par Le Gall *et al.* (2015).

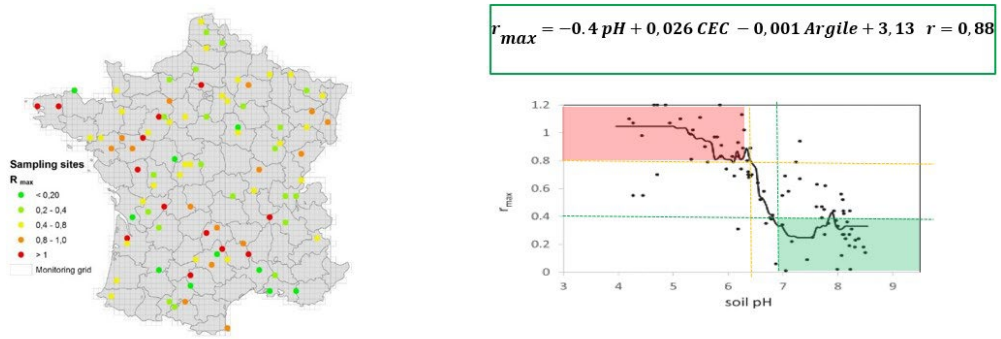
A l'échelle régionale (en Bourgogne Franche-Comté), les calculs ont été réalisés en mobilisant les bases de données (BDD) (i) Sols, IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) à résolution de UCS (unité cartographique des sols), (Chrétien et Laroche, 2006), BDAT (Base de données d'Analyse des Terres, Saby *et al.*, 2014) et ESDAC (European Soil Data Center, Ballabio *et al.*, 2016) à résolution communale, (ii) des variables de culture issus de la BDD des successions culturales parcellaires (Martin *et al.*, 2021) et (iii) la BDD DRIAS[l]es futurs du climat pour les données pluviométriques (Lémond, 2010). De plus, les cartes parcellaires des apports annuels d'azote minéral et organique ont été construites en prenant en compte la carte des zones vulnérables aux nitrates et les données départementales des apports d'azote par culture (DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement), 2017).

Les calculs ont été réalisés une première fois à partir de l'ensemble de ces données, puis une seconde fois dans le contexte d'une application théorique d'un chaulage des sols acides permettant d'atteindre le pH de 6.8. Pour le changement d'échelle de la parcelle cultivée à la France, nous avons utilisé différentes approches (« CART-FDA », « cumulative frequency », « map_rmqs » – Hénault *et al.*, 2019) pour calculer l'applicabilité potentielle du chaulage climatique. L'utilisation de différentes approches de calcul permet de proposer un intervalle aux valeurs estimées.

3. Résultats

3.1. Capacité des sols à réduire N_2O

Parmi les 90 sites du RMQS testés, nous avons observé que 29 d'entre eux, soit 32 %, présentaient une bonne capacité à réduire N_2O en N_2 (PhN_2Ored^+) tandis que 36 sites (40 %) sont apparus inaptes à réduire N_2O en N_2 (PhN_2Ored^-). Les 25 autres sites (28 %) ont présenté un comportement intermédiaire ($PhN_2Ored^{+/-}$), (Figure 2). Une relation de pédotransfert a pu être établie entre la capacité des sols à réduire N_2O et une combinaison entre les facteurs pH, CEC (capacité d'échange cationique) et teneur en argile, le pH étant la propriété explicative principale. La meilleure relation obtenue entre capacité des sols à réduire N_2O et pH est une fonction en escalier avec 2 valeurs de pH caractéristiques : pH 6.4 en deçà duquel les sols apparaissent globalement incapables de réduire N_2O, et pH 6.8 au-delà duquel la réduction de N_2O en N_2 est facilitée.



r_{max} < 0.4 (PhN_2Ored^+) ; r_{max} > 0.8 (PhN_2Ored^-) ; 0.4<r_{max} < 0.8 ($PhN_2Ored^{+/-}$)

Figure 2 : Répartition spatiale et déterminisme de la capacité des sols à réduire N_2O en N_2

Exprimé selon l'étude GES, ce résultat montre une « assiette » potentielle d'intervention importante à l'échelle de la France, ce qui nous a encouragé à continuer dans cette voie.

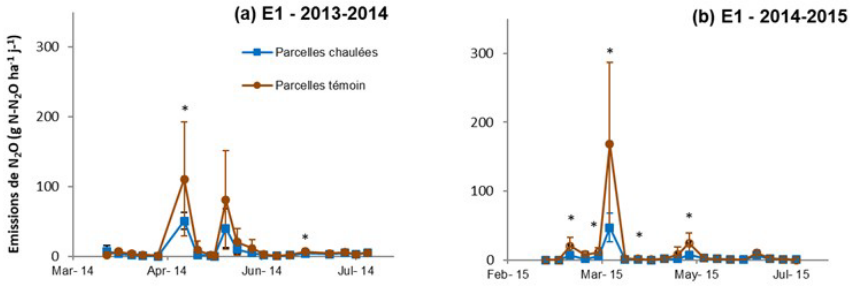
3.2. Le chaulage : levier d'atténuation des émissions de N_2O par les sols ?

3.2.1. Principe

Dérivé de la relation en escalier présenté ci-dessus (Figure 2), le chaulage des sols acides, jusqu'à un pH de 6.8 est alors apparu comme un levier possible d'atténuation des émissions de N_2O par les sols : c'est ce que nous appelons le chaulage climatique. Il s'agit d'un chaulage un peu plus poussé que celui généralement utilisé pour améliorer les propriétés des sols et les rendements des cultures, plutôt préconisé pour atteindre un pH compris entre 6.2 et 6.5.

3.2.2. Impact sur les émissions de N_2O observés in situ

Sur le site expérimental ARVALIS de la Jaillière, où d'importantes émissions de N_2O (> 100 g N-N_2O ha^{-1} j^{-1}) ont été observées sur les parcelles témoin, des abattements d'émission de l'ordre de 70 % ont été observés sur les parcelles ayant reçu le produit chaulant en comparaison avec les parcelles témoin (Figure 3).



* indique une différence significative entre les flux mesurés sur les différentes modalités.

Figure 3 : Emissions de N_2O mesurées sur le site de La Jaillière.

Sur le site situé dans le Cher, dans un contexte d'émission de N_2O sur les parcelles témoin plus faibles que sur le site de la Jaillière (max 10 g N-N_2O ha^{-1} j^{-1}), un abattement de 26 % des émissions a été observé après apport de produit chaulant par rapport au témoin. La médiane de ces valeurs est de 49 %.

3.2.3. Quantification des abattements potentiels de N_2O à l'échelle de la Région Bourgogne- Franche-Comté et de la France

Nous avons chiffré un abattement potentiel des émissions de N_2O par l'application de produits chaulant à l'échelle de la Bourgogne Franche-Comté de 15 %. Les différentes étapes de ce calcul sont disponibles dans le dataverse INRAe (https://doi.org/10.57745/94WYGJ), tandis que la carte des potentiels de réduction à la résolution de la communauté de communes est disponible sur la plateforme Opteer (https://www.opteer.org/donnees-territoires/11473/consulter/?Territoire=5075&Type2Territoire=63). A l'échelle de la France, la médiane des valeurs calculées par les différentes méthodes est de 16 %. Les valeurs ont été comprises entre 13 et 33 % selon les méthodologies mobilisées (Hénault *et al.*, 2019).

3.2.4. De N_2O à CO_2

Sur le site expérimental situé près de Saulieu, nous avons mesuré de faibles émissions de N_2O quelles que soient les modalités considérées (témoin et chaulées) et des émissions de CO_2 comprises entre 2 et 60 kg C-CO_2 ha^{-1} j^{-1}, présentant des variations saisonnières cohérentes avec les variations de température. Contrairement à l'hypothèse selon laquelle l'intégralité du C des carbonates de calcium apportés au sol est systématiquement perdue sous forme CO_2 l'année de l'apport - ce qui correspondrait globalement à une augmentation de 10 % des émissions de sol pouvant remettre en cause l'intérêt climatique du chaulage - nous avons observé à l'échelle de la parcelle cultivée sur notre

site expérimental, une forte diminution (-36 %) des émissions de CO_2 du sol après apport de $CaCO_3$ (figure 4).

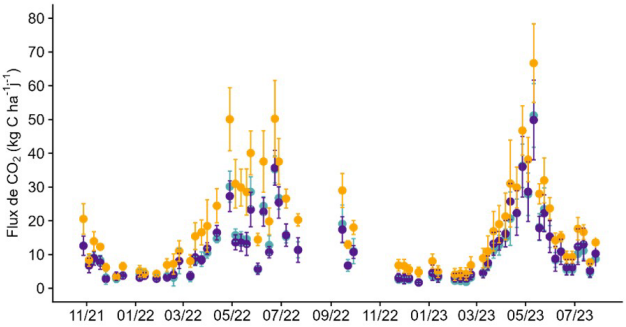


Figure 4 : Emissions de CO_2 mesurées sur le site situé près de Saulieu après apport de produits chaulant

3.3. Utilisation des *rhizobia* pour réduire N_2O en N_2

A l'exception du pois, nous avons identifié dans la collection MIAE (i) des *rhizobia* possédant les gènes *nosZ*, symbiotiques de chacune des espèces de légumineuses étudiées, ainsi que (ii) des souches ne possédant pas le gène, ces souches étant utiles pour les expérimentations. Pour le pois, l'isolement *de novo* a permis d'obtenir des isolats *nosZ*$^+$. Nous avons pu démontrer, pour toutes les espèces de légumineuses étudiées à l'échelle du système plantes – microbes, leur capacité à réduire N_2O, avec des intensités différentes selon le couple considéré (Hénault *et al.*, 2022).

Les signaux les plus forts ont été obtenus sur soja avec la souche G49 (souche commercialisée en France pour l'inoculation du soja) et sur lupin avec la souche LL200. Au champ, l'inoculation du soja avec la souche *nosZ*$^+$ G49 a permis d'observer pendant la période de végétation non fertilisée, des abattements d'émission de l'ordre de 80 % représentant plusieurs g de $N\text{-}N_2O$ ha^{-1} j^{-1} (Figure 5).

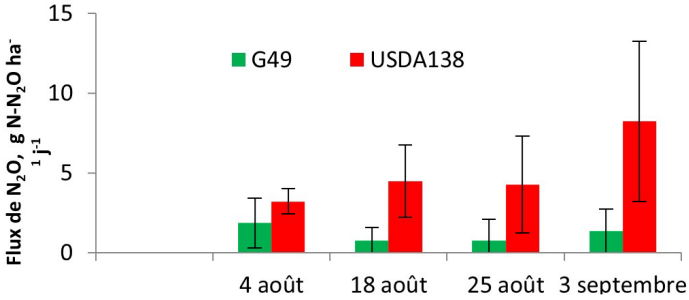


Figure 5 : Emissions de N_2O mesurées *in situ* au cours de l'essai expérimental conduit sur le site INRAe de Ardon avec culture de soja inoculée avec la souche G49 (*nosZ*$^+$) et la souche USDA138 (*nosZ*$^-$) * indique une différence significative entre les flux selon la souche inoculée

4. Discussion

Actuellement, nous sommes en capacité de présenter des chroniques d'évitements d'émission de N_2O et de CO_2 par les sols, obtenues in situ grâce à des leviers utilisables par toutes les formes d'agriculture, i.e. le chaulage climatique et l'inoculation des légumineuses avec des souches possédant les gènes nosZ. Nos travaux ont permis de réaliser les preuves de concept, de franchir l'étape critique de démonstration *in situ* et de calculer des atténuations potentielles à échelle régionale et nationale pour ce premier levier.

Au vu de sa complexité, on pourrait être tenté de schématiser le cycle de l'azote par une énorme pelote de laine, bien emmêlée. Pour diminuer les émissions de N_2O par les sols, nous avons cherché à tirer sur un bout de cette pelote, celui de la dernière étape de la dénitrification, i.e. la réduction de N_2O en N_2, du gène à la parcelle agricole. En tirant sur ce bout de laine, nous avons aussi tiré sur l'énorme pelote qu'est le cycle du carbone. L'expérience montre que ces 2 cycles sont souvent entremêlés, mais leur point de rencontre n'a pas été là où on l'attendait ! En 2001, nous avons observé au laboratoire une

stimulation du fonctionnement de la N_2O réductase par un apport de lisier (Hénault *et al*., 2001). Nous avons alors envisagé un contrôle du fonctionnement de l'enzyme N_2O réductase par la disponibilité en carbone du sol. Sur la base des résultats obtenus plus récemment, nous pensons maintenant que l'apport de lisier avait eu un effet sur le fonctionnement de la N_2O réductase, non pas par le C qu'il avait apporté mais par le pH du sol qu'il avait augmenté. Nos travaux montrent donc, un lien, indirect certes, entre les cycles du carbone et de l'azote via le chaulage climatique, conciliant la réduction des émissions de N_2O et celles de CO_2, obtenues toutefois par des mécanismes très différents.

Le pH du sol avec une valeur caractéristique à 6.8 est ressorti comme le principal facteur de contrôle de la réduction de N_2O en N_2 dans les sols. Ce résultat est très intéressant tant au niveau fondamental qu'appliqué car cette propriété peut être gérée, par exemple, en chaulant les sols acides, sachant que différents matériaux peuvent être utilisés dans ce but et que les sols acides représentent plus d'un tiers des sols français. Bien qu'un peu supérieur au pH généralement préconisé en agriculture pour améliorer la qualité des sols et la production agricole, cette valeur cible (pH > 6.8) n'apparait pas aberrante d'un point de vue écosystémique et économique. Wang *et al*., (2018) ont également mis en évidence cette valeur de pH, en observant en Chine, que le facteur d'émission des fertilisants apportés au sol de 1,0 %, proposé par le GIEC jusque récemment, est pertinent pour les sols dont le pH est supérieur à 6.8 et augmente à mesure que le pH diminue. Au cours d'expérimentations de laboratoire conduites à des valeurs de pH de 4,0, 6,1 et 8,0, Liu *et al*., 2014 ont également observé que le pH bas du sol empêchait la réduction de N_2O. La littérature converge pour expliquer ce fait par un assemblage altéré de l'enzyme N_2O réductase aux bas pH (Bergaust *et al*., 2010). Les valeurs d'abattement des émissions de N_2O que nous avons observées in situ (26 %, 49 % et 66 %) sont cohérentes avec les observations de Mac Millan *et al*. (2016) et de Shaaban *et al*. (2015) qui ont publié des valeurs de réduction des émissions de N_2O en chaulant les sols acides, variant de 16 % à 64 % selon le type de sol, les conditions de température et les apports azotés. La convergence de l'ensemble de ces résultats, incluant des essais en France, a favorisé l'inclusion de ce levier dans la méthodologie du label bas carbone en grandes cultures (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/M %C3 %A9thode %20LBC %20Grandes %20cultures.pdf).

Au vu de la règle générale prévoyant que tout le carbone des carbonates de calcium est émis sous forme CO_2 (Hergoualc'h *et al*., 2019), les évitements d'émission de CO_2 que nous avons récemment observés sur le site près de Saulieu, n'étaient pas attendus. La méta-analyse proposée par Zhang *et al*. (2022) présente globalement une augmentation des émissions après chaulage sachant que néanmoins plusieurs articles utilisés lors de cette méta-analyse mentionnent des émissions de CO2 équivalentes ou plus faibles après apport au champ de produits chaulant (Galbally *et al*., 2010 ; Lochon *et al*., 2019). Sur la base de la publication de West et MacBride, 2005 qui suggère une surestimation des émissions de CO_2 après apport de carbonate de calcium par la règle générale, la méthodologie du GIEC laisse ouverte la possibilité d'un calcul différent permettant des estimations d'émissions de CO_2 inférieures à celles issues de l'application de cette règle. De notre côté et à ce stade du travail, nous formulons deux hypothèses pour expliquer la diminution observée des émissions de CO_2 des sols après apport de produits chaulant (i) le mécanisme pompe à CO_2 où le carbonate de calcium mobilise du CO_2 pour former l'ion bicarbonate mobile dans les formes aqueuses (Hamilton *et al*., 2007), et (ii) la stabilisation de la matière organique par le Ca2+ (Rowley *et al*., 2018). Il est aussi possible que d'autres mécanismes soient impliqués. Ainsi, pour une application sécurisée de ce levier, il nous apparait essentiel que la généricité de ce résultat soit validée et que les mécanismes sous-jacents à ces évitements d'émission (et leur régulation par les facteurs environnementaux) soient compris et quantifiés à différentes échelles spatiales et temporelles. Dans le contexte du changement climatique que nous connaissons, les recherches sur l'identification et la compréhension du fonctionnement de ces mécanismes, s'avèrent essentielles et urgentes.

Concernant l'utilisation des rhizobia nosZ+, nos travaux sont reconnus au niveau international (Bakken *et al*., 2020) sachant qu'actuellement les autres équipes les plus actives sur ce sujet sont situées au Japon (Akiyama *et al*., 2016), en Amérique du Sud (Obando *et al*., 2019) et en Norvège (Woliy *et al*., 2019). A titre d'exemple, l'équipe japonaise travaille principalement sur le soja avec différentes approches microbiologiques et mise en place d'essais au champ qui ont montré l'importance de prendre en compte la période de décomposition des racines. Il est aussi important de rappeler que par exemple la souche G49 utilisée en France pour inoculer le soja est aussi très bonne fixatrice d'azote. Dans l'état actuel des connaissances, nous n'avons trouvé aucun argument défavorable à l'inoculation des légumineuses avec une souche naturelle nosZ+, comparativement à l'inoculation avec une souche nosZ-. Ainsi, l'inoculation des légumineuses avec des souches nosZ-, quand l'équivalent nosZ+ est disponible, prive l'écosystème terrestre d'une fonction puits de N2O, naturelle, renforcée par l'homme, et ne nécessitant aucun moyen supplémentaire de mise en œuvre.

Enfin, d'autres leviers pour réduire les émissions de GES sont aussi à travailler. Notre approche multi-échelle basée sur la gestion de la réduction de N_2O en N_2 peut être étendue aux autres processus microbiens impliqués dans ces émissions. Par exemple le contrôle de l'irrigation des cultures ou le drainage des sols pour limiter l'activité de dénitrification des nitrates constituent une piste très importante tout comme le contrôle des émissions de N_2O par nitrification. Plus proche des propositions formulées par le GIEC, l'optimisation de la nutrition azotée des plantes peut limiter l'ensemble des pertes azotées sous forme gazeuse ou dissoute.

5. Conclusions

Nos travaux permettent de présenter des chroniques d'abattement des émissions de N_2O par les sols grâce à l'application de deux leviers utilisables par toutes les formes d'agriculture, le chaulage climatique et l'inoculation de légumineuses avec des souches possédant les gènes nosZ+. Ces leviers sont issus d'études préalables que nous avons conduites dans le but de stimuler la réduction de N_2O en N_2. Chemin faisant, nos travaux sur le chaulage climatique ouvre aussi des perspectives sur l'atténuation des émissions de CO_2 par les sols pour lesquelles des recherches sur les mécanismes sous-jacents, sur les facteurs environnementaux d'influence et sur la généricité des résultats actuels sont requises.

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

Catherine HENAULT : https://orcid.org/0000-0002-1210-2499

Mustapha ARKOUN : https://orcid.org/0000-0002-7676-5494

Elodie BARBIER : https://orcid.org/0009-0004-4529-0555

Cécile LE GALL : https://orcid.org/0000-0002-1874-6009

Nicolas SABY : https://orcid.org/0000-0001-8964-1194

Camille ROUSSET : https://orcid.org/0000-0002-9251-3959

Contributions des auteurs

C. Hénault : Rédaction, conception et réalisation des travaux, montage et gestion des projets. M. Alkassem : Changement d'échelles. M. Arkoun : Conception et suivi des travaux sur le chaulage. E. Barbier : Détection du gène *nosZ* des souches de la collection MIAE. A. Besnault : Caractérisation de la capacité des sols du RMQS à réduire N_2O. F. Bizouard : Gestion de l'essai de Saulieu. H. Bourennane : Relecture, modélisation et changement d'échelles, suivi de projet. V. Bourion : Expérimentations avec légumineuses. H. Bréfort : Expérimentation et suivi de projets. T. Eglin : Relecture, conception et suivi de projets, G. Guyerdet : Expérimentation. A. Hartmann Expérimentation, conception et suivi de projets sur les *rhizobia*. C. Le Gall : Conception et suivi de projets et d'expérimentation. C. Revellin : Expérimentation, montage et suivi de projets sur les *rhizobia.* N. Saby : Modélisation et mobilisation du RMQS. C. Rousset : Rédaction, conception et réalisation des travaux sur le chaulage.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Nous remercions les membres des comités de pilotage des projets *NatAdGES* et SOLGES pour le temps qu'ils ont consacré au suivi de ces projets et pour les échanges riches lors des réunions de comité.

Nous remercions GISSOL pour l'accès aux données et méthodologies relatives aux sols. Nous remercions ARVALIS pour son accueil sur le site de La Jaillière.

Déclaration de soutien financier

Ce travail a été soutenu par le programme « Investissements d'Avenir », projet ISITE-BFC *NatAdGES* (contrat ANR-15-IDEX-0003 ; N° Synergie FEDER BG0025603 ; N° BPI France DOS0112927/00 ; CMI-Roullier), par l'ADEME, projet Reacctif SOLGES (contrat 1260C0040) et par l'ex-Région Bourgogne.

Références bibliographiques

Akiyama H, Hoshino Y, Itakura M. *et al.* 2016. Mitigation of soil N_2O emission by inoculation with a mixed culture of indigenous Bradyrhizobium diazoefficiens. Sci. Rep. 6, 32869. https://doi.org/10.1038/srep32869

Bakken LR, Frostegård Å. 2020. Emerging options for mitigating N_2O emissions from food production by manipulating the soil microbiota. COSUST. 47, 89-94. ISSN 1877-3435. https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.08.010.

Ballabio C, Panagos P, Monatanarella L. 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. Geoderma. 261, 110-123. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.006.

Bergaust L, Mao Y, Bakken L, Frostegard A. 2010. Denitrification Response Patterns during the Transition to Anoxic Respiration and Posttranscriptional Effects of Suboptimal pH on Nitrous Oxide Reductase in Paracoccus denitrificans. Appl. Environ. Microbiol. 76, 6387-96. 10.1128/AEM.00608-10.

Butterbach-Bahl K, Baggs EM, Dannenmann M, Kiese R, Zechmeister-Boltenstern S. 2013. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Philos. Trans. R. Soc. 368, 20130122. doi: 10.1098/rstb.2013.0122.

Chrétien J, Laroche B. 2006. L'inventaire des sols de Bourgogne. Rev. Sci. Bourgogne-Nature. 4, 18-20.

DREAL, 2017. Evaluation de la mise en œuvre des 5èmes Programmes d'actions dans les zones vulnérables des deux ex-régions Bourgogne et Franche-Comté. réfPLACE : « DrealBFC-17-SBEP-PAR ».

Galbally IE, Meyer M, Wang YP, Smith CJ, Weeks IA. 2010. Nitrous oxide emissions from a legume pasture and the influences of liming and urine addition. Agric. Ecosyst. Environ. 136, 262-272. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.10.013.

Hamilton SK, Kurzman AL, Arango C, Jin L, Robertson GP. 2007. Evidence for carbon sequestration by agricultural liming. Glob. Biogeochem. Cycles 21. doi:10.1029/2006GB002738

Hénault C. Les étapes dans le sol des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote : Incidences environnementales des activités anthropiques. 2004. Habilitation à Diriger des Recherches. Ecole doctorale Buffon. Université de Bourgogne, 68 p. 55 dias.

Hénault C, Barbier E, Hartmann A, Revellin C. 2022. New Insights into the Use of *Rhizobia* to Mitigate Soil N_2O Emissions. Agriculture. 12, 271. https://doi.org/10.3390/agriculture12020271.

Hénault C, Bourennane H, Ayzac A *et al.* 2019. Management of soil pH promotes nitrous oxide reduction and thus mitigates soil emissions of this greenhouse gas. Sci. Rep. 9, 20182. https://doi.org/10.1038/s41598-019-56694-3.

Hénault C, Cellier P, Jeuffroy MH, Nicolardot B, Revellin C. 2009. Réduire les émissions par les sols du gaz à effet de serre, N_2O. COMIFER-GEMAS – 9ème rencontres de Blois – Fertilisation raisonnée et analyses de terre : quoi de neuf en 2009 ? Blois, 25-26 nov 2009. (communication orale invitée, résumé, texte intégral).

Hénault C, Chèneby D, Heurlier, K, Garrido, F, Perez S, Germon JC. 2001. Laboratory kinetics of soil denitrification are useful to discriminate soils with potentially high levels of N_2O emission on the field scale. Agronomie. 21 : 713-723. https://doi.org/10.1051/agro:2001165.

Hergoualc'h K, Akiyama H, Bernoux M, Chirinda N, del Prado A, Kasimir A, MacDonald JD, Ogle SM, Regina K, van der Weerden TJ. 2019. N_2O Emissions from Managed Soils, and CO_2 Emissions from Lime and Urea Application. In: Calvo Buendia E, Tanabe K, Kranjc A, Baasansuren J, Fukuda M, Ngarize S, Osako A, Pyrozhenko Y, Shermanau P and Federici S. (eds). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://hdl.handle.net/10568/112778

Le Gall C, Cellier P, Hénault C. 2015. Emissions par les sols du gaz à effet de serre N_2O. In: Bernard Bourges, Jean-Sébastien Broc, Thomas Gourdon, dir., Empreinte carbone : évaluer et agir (p. 27-50). Paris, FRA : Transvalor - Presses des Mines.

Lémond J. 2010. Le projet DRIAS : premières études et documents ; CNRM / GAME, Météo-France, CNRS ; Direction de la Climatologie. Réunion Comité Utilisateurs, le 29 juin 2010. https://www.drias-climat.fr/ref

Liu B, Frostegård Å, Bakken L. 2014. Impaired reduction of N_2O to N_2 in acid soils is due to a posttranscriptional interference with the expression of *nosZ*. mBio. 5: e0183-14.

Lochon I, Carrère P, Yvin JC, Houdusse-Lemenager D, Bloor JMG. 2019. Impacts of low-level liming on soil respiration and forage production in a fertilized upland grassland in Central France. Sci. Total Environ. 697, 134098. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134098.

Mac Millan AS, Pal P, Phillips RC, Palmada T, Berben PH, Jha N, Saggar S, Luo J. 2016. Can pH amendments in grazed pastures help reduce N_2O emissions from denitrification? – The effects of liming and urine addition on the completion of denitrification in fluvial and volcanic soils. Soil Biol. Biochem. 93, 90-104.

Martin P, Rabenandrasana N.*et al.* 2021. RPG Explorer Crop successions France 2007-2014, 2007-2019, 2015-2019, Portail Data INRAE, V2, UNF:6:WJbvCafksh00/+PmNl2Zcg https://doi.org/10.15454/XH84QB.

Obando M, Correa-Galeote D, Castellano-Hinojosa A, Gualpa J, Hidalgo A, Alché JD, Bedmar E, Cassán F. 2019. Analysis of the denitrification pathway and greenhouse gases emissions in Bradyrhizobium sp. strains used as biofertilizers in South America, J. Appl. Microbiol. 127, 739–749, https://doi.org/10.1111/jam.14233.

Orellana LH, Rodriguez-R LM, Higgins S, Chee-Sanford JC, Sanford RA, Ritalahti KMLöffler FE, Konstantinidis KT. 2014. Detecting Nitrous Oxide Reductase (*nosZ*) Genes in Soil Metagenomes: Method Development and Implications for the Nitrogen Cycle. mBio 5:10.1128/mbio.01193-14.

Pauleta SR, Carepo M, Moura I. 2019. Source and reduction of nitrous oxide. Coordination Chemistry Reviews, 387 : 436-449, https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.02.005.

Pellerin S, Bamière L, Angers D, Béline F, Benoît M, Butault JP, Chenu C, Colnenne-David C, De Cara S, Delame N, Doreau M, Dupraz P, Faverdin P, Garcia-Launay F, Hassouna M, Hénault C, Jeuffroy MH, Klumpp K, Metay A, Moran D, Recous S, Samson E, Savini I, Pardon L. 2013.Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction desémissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Rapport d'étude, INRA (France), 454p.

Rémy JC et Marin-Laflèche A. 1974: L'analyse de terre : réalisation d'un programme automatique. Annales agronomiques, 25, 607-632.

Rousset C, Mathieu O, Brefort H, Guyerdet G, Bizouard F, Frederico Fonseca R , Jovovic I, Santoni AL, Arkoun M, Hénault C. 2023. Impact de l'apport de produits chaulant sur les émissions de CO_2 du sol : des effets contrastés observes à différentes échelles. 16èmes rencontres du Comifer-Gemas. Tours, 21-22 novembre 2023. Présentation poster + résumé.

Rousset C, Bréfort H, Frederico Fonseca R, Guyerdet G, Bizouard F, Arkoun M, Hénault C. 2024. Surprising minimisation of CO_2 emissions from a sandy loam soil over a rye growing period achieved by liming ($CaCO_3$). Sci. Total Environ. 953 : 175973. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175973.

Rowley MC, Grand S, Verrecchia ÉP. 2018. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. Biogeochemistry 137, 27–49. doi:10.1007/s10533-017-0410-1

Saby N, Lemercier B, Arrouays D, Leménager S, Louis B, *et al.* 2014. Le programme Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) : Bilan de 20 ans de collecte de résultats d'analyses. EGS, 2014, 21, pp.141-150. hal-01209243.

Sameshima-Saito R, Chiba K, Hirayama J, Itakura M, Mitsui H, Eda S, Minamisawa K. 2006. Symbiotic *Bradyrhizobium japonicum* Reduces N_2O Surrounding the Soybean Root System via Nitrous Oxide Reductase. Appl. Environ. Microbiol. 72(4), 2526–2532. doi: 10.1128/AEM.72.4.2526-2532.2006.

Shaaban M, Peng Q, Hu R, Wu Y, Lin S, Zhao J. 2015. Dolomite application to acidic soils: a promising option for mitigating N_2O emissions. Environ. Sci. Pollut. Res. 22, 19961–19970. doi:10.1007/s11356-015-5238-4

Smith P, Bustamante H, Ahammad H, Clark H, Dong EA, *et al.* 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Stehfest E, Bouwman A. 2006. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modelling of global annual emissions. Nutr. Cycl. Agroecosystems. 74:207-288.

Wang Y, Guo J, Vogt RD, Mulder J, Wang J, Zhang X. 2018. Soil pH as the chief modifier for regional nitrous oxide emissions: new evidence and implications for global estimates and mitigation. Glob. Change Biol. 24:e617-e626.

West TO, McBride AC. 2005. The contribution of agricultural lime to carbon dioxide emissions in the United States: dissolution, transport, and net emissions. Agric. Ecosyst. Environ. 108, 145–154. doi:10.1016/j.agee.2005.01.002

Woliy K, Degefu T, Frostegård Å. 2019. Host Range and Symbiotic Effectiveness of N_2O Reducing *Bradyrhizobium* Strains. Front. Microbiol. 10, 2746. doi: 10.3389/fmicb.2019.02746.

Zhang HM, Liang Z, Li Y, Chen ZX, Zhang JB, Cai ZC, Elsgaard L, Cheng Y, van Groenigen KJ, Abalos D. 2022. Liming modifies greenhouse gas fluxes from soils: A meta-analysis of biological drivers. Agric. Ecosyst. Environ. 340, 108182. https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108182.

Pour citer cet article : Catherine Henault, Mohamed Alkassem-Alosman, Mustapha Arkoun, Elodie Barbier, Adeline Besnault, *et al*.. Diminuer les émissions de gaz à effet de serre par les sols en réduisant N2O en N2. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.15_27. 10.17180/ciag-2025-vol102-art02

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.

Les engrais bas carbone : un levier de réduction des émissions de GES des filières agricoles

Cédric BOUDES[1]

[1] Yara France, Chem. de Pietru, 33810 Ambès, France

Correspondance : cedric.boudes@yara.com

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art03

Résumé

Les engrais azotés minéraux bas carbone sont des leviers importants de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre dans les filières agricoles et agroalimentaires. La société Yara, forte de son expérience dans la production des engrais azotés depuis 1905, a mis au point des technologies qui permettent de réduire fortement ses émissions de N_2O vers l'atmosphère et continue de nos jours à réduire son empreinte carbone. Pour exemple : le projet réalisé en 2024 dans le cadre du programme DECARB INDUSTRIE a permis de réduire de 50 000 teq CO_2 /an les émissions vers l'atmosphère en optimisant la catalyse N_2O de la production d'acide nitrique sur le site Yara Ambès. La réduction de l'empreinte carbone peut atteindre jusqu'à 90 % pour la filière des engrais, 30 % dans les filières agricoles et 20 % dans les filières agroalimentaires en utilisant les meilleurs pratiques de production et d'utilisation des intrants.

Mots-clés : Yara, engrais azotés, engrais bas carbone, décarbonation des filières, GES, N_2O, ammonitrate, catalyse N_2O.

Abstract: Low-carbon fertilizers: a lever for reducing greenhouse gas emissions from agricultural sectors

Low-carbon mineral nitrogen fertilizers are important levers for reducing greenhouse gas emissions in the agricultural and agri-food sectors. Yara, with its experience since 1905 in the production of nitrogen fertilizers, has developed technologies that significantly reduce its N_2O emissions into the atmosphere and continues to reduce its carbon footprint today. For example, the project carried out in 2024 as part of the DECARB INDUSTRIE program made it possible to reduce emissions to the atmosphere by 50,000 teq CO_2/year equivalent by optimizing the N_2O catalysis of nitric acid production at Yara Ambès. The reduction in the carbon footprint can reach up to 90 % for the fertilizer sector, 30 % for the agricultural sectors and 20 % for the agri-food sectors by using best practices in production and use of inputs.

Keywords: Yara, nitrogen fertilizers, low-carbon fertilizers, foodchain decarbonization, N_2O catalysis

1. Introduction

La décarbonation des filières agricoles est un enjeu important pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050. La société Yara, acteur majeur de la production d'engrais azotés, développe depuis plusieurs années des technologies qui permettent de réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) au niveau de ses sites de production et de ses produits. La technologie de catalyse N_2O est un exemple qui continue à se déployer et à s'optimiser dans de nombreuses usines du groupe telle que celle d'Ambès en Gironde. Le recours à des techniques de production efficiente, des formes d'engrais hautement assimilables et des Outils d'Aide à la Décision (OAD) ont des effets notables sur les bilans d'émissions de GES de la production de blé et sur l'empreinte carbone des filières agroalimentaires.

2. Présentation de la société Yara : acteur majeur de la production d'engrais depuis 1905

2.1. Les origines de Yara

Yara a été officiellement fondée en 2004. Son origine remonte en réalité au tout début du XXe siècle.

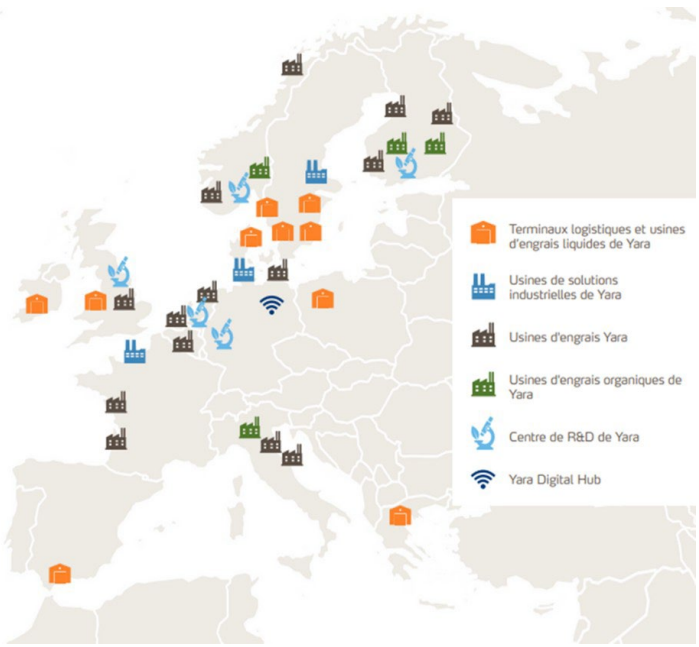
En 1903, le procédé Birkeland-Eyde basé sur un arc électrique, permet la synthèse d'acide nitrique comme précurseur des engrais azotés. L'énergie hydraulique, abondante en Norvège, fournira l'énergie nécessaire à cette synthèse. En 1905, la société Norsk Hydro est fondée et se lance dans la production de nitrate de calcium, le premier engrais azoté à être industrialisé.

Au tournant des années 1930, l'entreprise obtient une licence pour utiliser une nouvelle méthode de production d'ammoniac (Haber-Bosch). Norsk Hydro quadruple sa capacité de production et dix ans plus tard, commence à produire de l'engrais composé NPK (azote, phosphore, potasse).

En 2005, l'entreprise qui opère désormais sous le nom de Yara fête son centenaire. Présente dans le monde entier avec 18 000 employés, des ventes dans plus de 140 pays et des opérations dans plus de 60 pays, Yara est aujourd'hui le leader de la production et de la commercialisation d'engrais minéraux azotés et également un producteur de référence de solutions environnementales azotées destinées notamment à réduire les émissions des sites industriels chimiques.

Les engrais bas carbone dont les premières tonnes sont d'ores et déjà commercialisées en France constituent un levier d'action important dans la décarbonation de la filière agroalimentaire.

2.2. Yara en Europe et en France



En 2023, la société Yara en Europe est composée de 21 sites de production d'engrais minéraux, d'engrais organiques et de biostimulants (figure 1). L'activité de la vente de fertilisants s'appuie sur un réseau de 140 terminaux et entrepôts. Yara compte également 2 centres de Recherche et Développement (R&D) agronomique basés en Allemagne (Hanninghof) et en Finlande (Kotkaniemi), où les innovations sont mises au point à la fois pour les solutions de nutrition et les outils d'aide à la décision. La recherche sur les process et l'ingénierie industrielle sont localisées en Norvège (Porsgrunn).

Figure 1 : Carte des installations Yara en Europe (source : Yara)

Yara a fait le choix de la France dès les années 1980 pour produire des engrais à destination des agriculteurs français et s'appuie aujourd'hui sur 3 sites :

- Montoir de Bretagne (Loire-Atlantique) : site de production jusqu'en 2023 est en cours de transformation pour devenir un terminal logistique et d'opérations ;

- Le Havre (Seine Maritime) dont la capacité de production est de 400 000 t/an d'ammoniac, 330 000 t/an d'urée et 184 000 t/an d'AdBlue est spécialisé dans la production de solutions destinées notamment à la décarbonation de l'industrie et des services. Cette usine planifie de réduire 45% de ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2030 et atteindre la neutralité carbone en 2050, grâce à sa feuille de route décarbonation élaborée avec l'État français qui s'est traduit par la signature du Contrat de Transition Énergétique[1] ;



Figure 2 : Site Yara Le Havre (crédit : Yara)

- Ambès (Gironde) construit en 1990 pour la production d'ammonitrate 33,5 à usage agricole, il s'agit de l'usine Yara la plus récente en Europe. D'une capacité de production de 550 000 t/an, l'ammonitrate destiné au marché français, bénéficie de la certification Origine France Garantie (n°705 4332) marquant ainsi l'ancrage dans le pays de cette fabrication. Plus de 100 personnes travaillent sur le site pour assurer le fonctionnement des ateliers dans les meilleures conditions de sécurité et d'efficacité.



Figure 3 : Site Yara Ambès (crédit : Yara)

3. Vers la neutralité carbone en 2050 : des sites de production Yara aux filières agroalimentaires

3.1. Bilan carbone de Yara

Le bilan des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) de la société Yara au niveau international en 2023 est de 58,4 millions de tonnes équivalent CO_2 (voir figure 5). Dans le cadre de la comptabilisation des émissions de GES, les différentes sources d'émissions de GES sont catégorisées par « scopes ». Le schéma de la figure 4 montre comment l'on distingue les différents scopes.

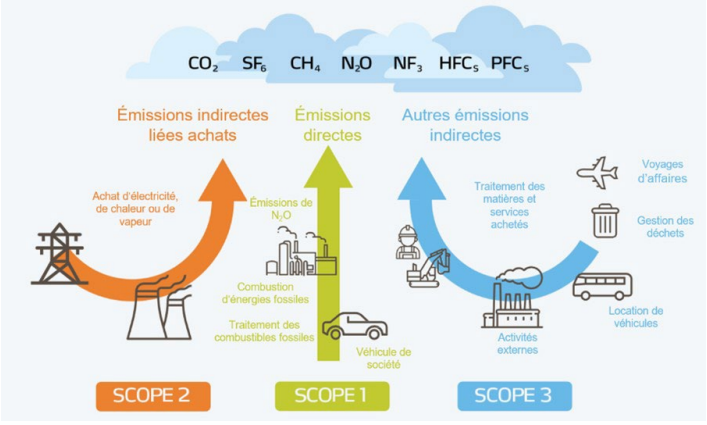


Figure 4 : Les émissions de GES et le périmètre des différents scopes (source : Yara)

Les sources d'émissions liées à la production d'engrais font partie du Scope 1 qui représente 25% du

[1] : Contrats de transition écologique des 50 sites industriels les plus émetteurs | Direction Générale des Entreprises

total pour la société Yara (figure 5). C'est le sujet que nous développerons à travers l'exemple d'un investissement récent sur le site Yara à Ambès.

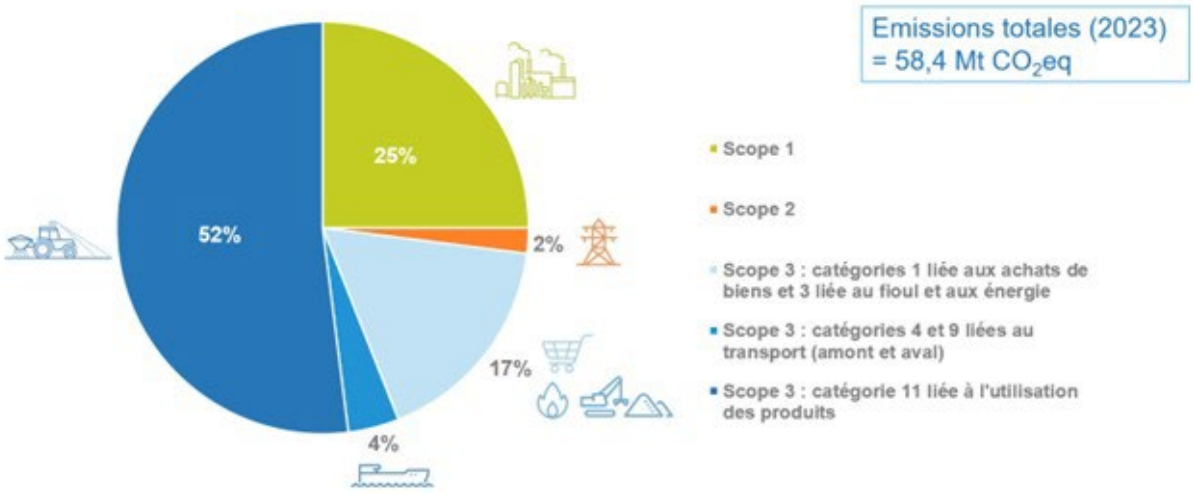


Figure 5 : D'où proviennent les émissions de GES de l'industrie des engrais azotés ? (Source : Yara Integrated report 2023)

La production d'engrais n'est pas le poste le plus important d'émissions car la majorité des émissions (scope 3 = 52 %) est liée à l'utilisation des produits fertilisants au champ.

C'est la raison pour laquelle la société Yara accompagne ses produits de différents outils d'aide à la décision pour que leur utilisation soit faite de la façon la plus efficace pour les cultures et en réduisant les risques de pertes. L'efficacité des engrais commence par une bonne connaissance des besoins des cultures afin d'apporter la bonne quantité, au bon endroit, au bon moment avec l'engrais le plus performant. Les émissions de N_2O sont liées principalement aux activités agricoles, parmi les leviers d'atténuation le raisonnement de la fertilisation azotée est un levier important. D'après la publication de Sylvie Recous « Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N_2O à l'échelle de la France », ce levier permet la réduction de dose 15 à 30 kg d'azote/ha/an.

3.2. La décarbonation des sites de production de Yara : exemple du site d'Ambès en Gironde

Au niveau des sites de production plusieurs solutions sont mises en œuvre pour réduire les émissions de GES. Par exemple, le site Yara à Ambès produit, grâce à un turbo-alternateur, 80 % de l'électricité consommée. Cette opération est possible grâce à la récupération de la chaleur produite lors de la réaction d'oxydation de l'ammoniac via un échangeur thermique qui permet de produire de la vapeur haute pression qui alimente les turbines nécessaires aux opérations de la production d'acide nitrique et du turbo-alternateur.

Dernièrement, le site a également remplacé l'ensemble des éclairages des ateliers par un éclairage LED ce qui permet d'économiser 1 GWh par an.

En avril 2024, avec le soutien de l'ADEME, le réacteur de l'atelier d'acide nitrique a été remplacé (voir figure 6) pour améliorer le processus d'abattement du protoxyde d'azote (N_2O).



Figure 6 : Vue du nouveau réacteur de l'atelier d'acide nitrique

du site Yara à Ambès. (Crédit photo : Yara)

Le nouveau réacteur est désormais en service et est une étape cruciale dans la feuille de route de décarbonation du site Yara Ambès.

Lauréat de l'appel à projet « décarbonation de l'industrie » (DECARB IND) de l'ADEME dans le cadre du plan France Relance, ce projet, d'un montant total de 10 millions d'euros dont 4,232 M€ financés par l'ADEME a permis le renouvellement du réacteur qui dispose d'une technique éprouvée de catalyseur de réduction de N_2O permettant d'améliorer l'abattement des GES. L'objectif visé de 99 % d'abattement de rejets de N_2O est aujourd'hui atteint et les données de mesures affineront la valeur définitive. Ce projet est également en cohérence avec la volonté du Grand Port Maritime de Bordeaux de décarboner la zone industrialo-portuaire bordelaise.

Yara, précurseur dans la recherche de solutions pour la décarbonation de ses activités, développe depuis les années 2000 des solutions innovantes au cœur de son centre de R&D. Grâce à l'amélioration continue de ses procédés industriels, le site de Yara à Ambès a ainsi vu ses émissions diminuer de manière constante depuis sa mise en service (figure 7) :

- dans les années 1990 le niveau d'émission était de 800 000 tonnes équivalent CO_2/an ;
- durant la période 2000–2010 ce niveau a diminué jusqu'à 70 000 tonnes équivalent CO_2/an ;
- aujourd'hui le niveau d'émission est de l'ordre de 10 000 tonnes équivalent CO_2/an.

soit un abattement de l'ensemble des rejets de gaz à effet de serre générés par l'activité de l'usine Yara à Ambès de l'ordre de 99 % en 30 ans.

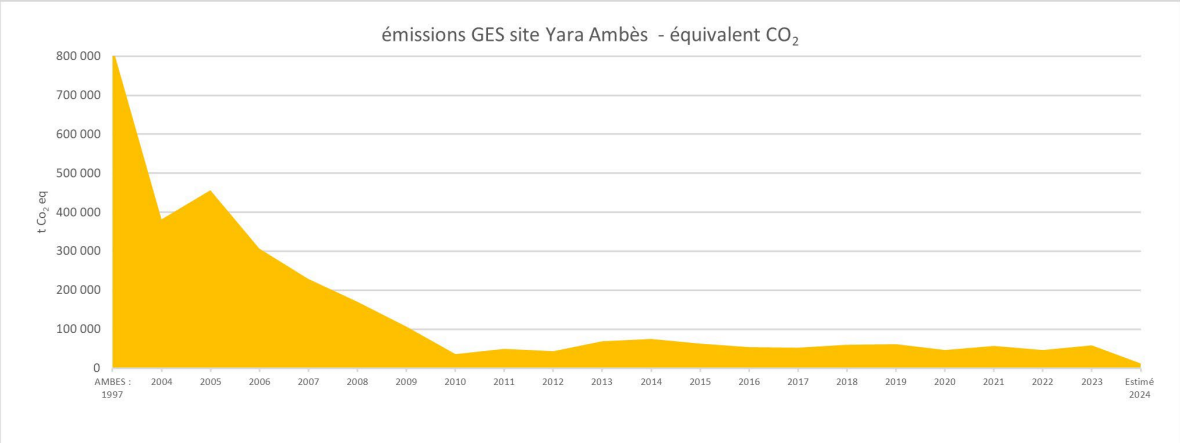


Figure 7 : Valeurs d'émissions de N_2O depuis1990 en tonne équivalent CO_2 du site Yara Ambès. (Source : Yara)

Dans le détail, le nouveau réacteur permet l'abattement de 50 000 tonnes d'équivalent CO_2/an supplémentaires soit l'équivalent des émissions annuelles de 25 000 voitures.

Plus globalement, Yara France vise la neutralité climatique d'ici à 2050. L'entreprise, de manière volontariste, a investi massivement (650 millions d'euros entre 2014 et 2023) sur ses sites de production.

3.3. Les engrais bas carbone, prochaines étapes de la décarbonation

La technologie catalytique développée par Yara dans les années 2000 est définie par l'Union européenne comme l'une des « Meilleures techniques disponibles[2] » (MTD) pour la production

[2] Documents BREF et conclusions MTD | AIDA (ineris.fr)

d'engrais. Son déploiement dans l'ensemble des usines du groupe en Europe (depuis 2007 en France) a d'ores et déjà permis de réduire de 50 % le niveau d'émission en tonne d'équivalent CO_2 (voir figure 8) des engrais produits.

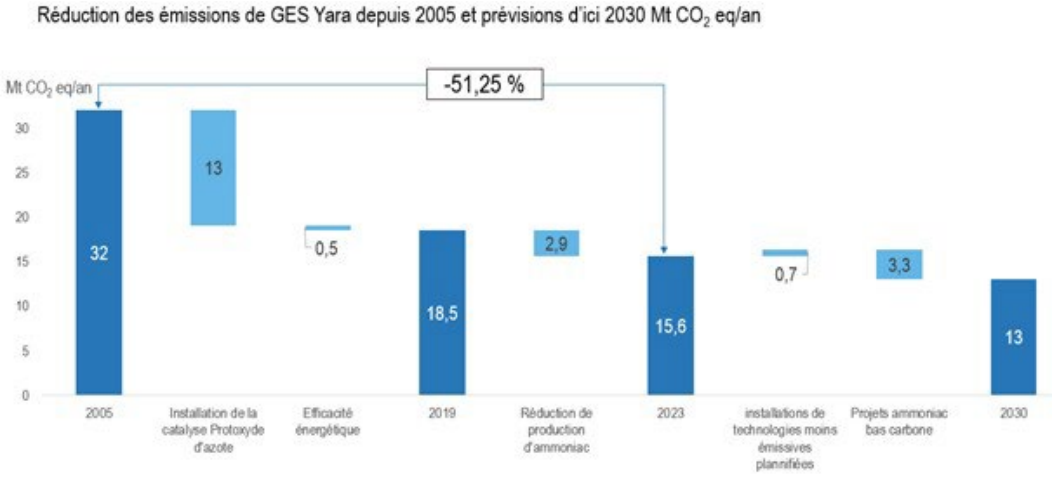


Figure 8 : diminution de l'empreinte carbone relative des productions européennes depuis 2005 et prévisions jusqu'en 2030 (source : Yara Integrated Report 2023, page 131)

L'enjeu des prochaines décennies sera de développer et soutenir la fabrication d'engrais bas carbone (voir figure 9). L'ammoniac est la clé de voute de l'ensemble de la production des engrais minéraux azotés.

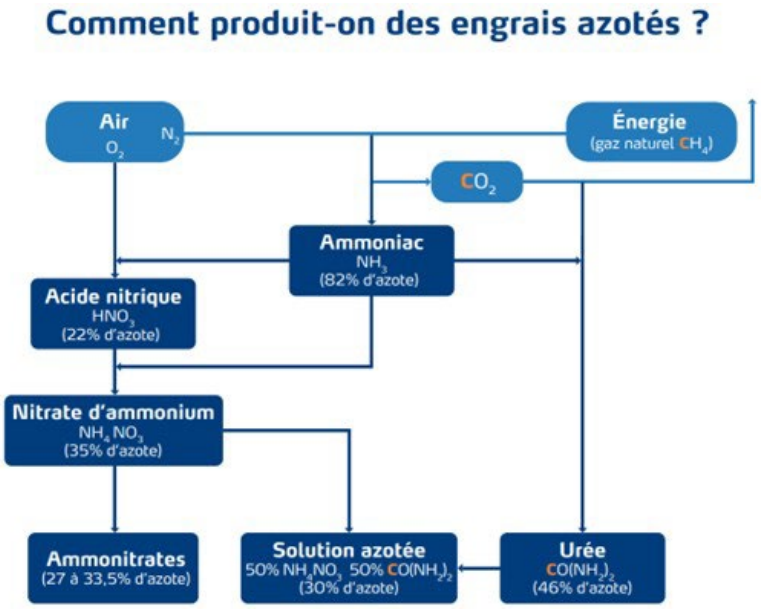
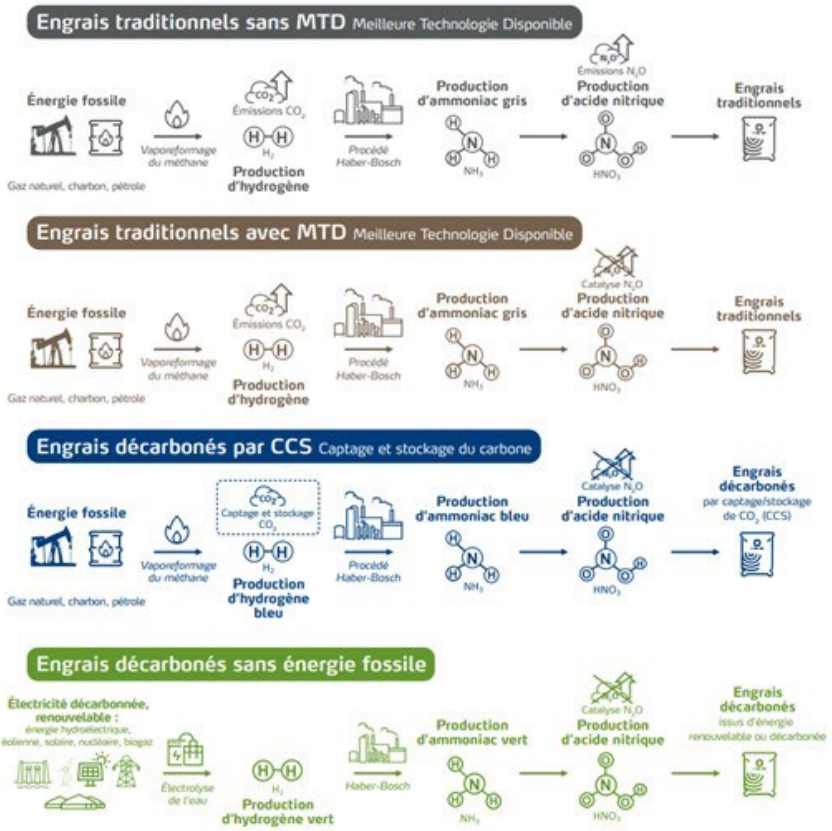


Figure 9 : Schéma de fabrication des engrais azotés minéraux, l'ammoniac clé de voute. (Source : Yara)

À l'heure actuelle, la technologie communément mise en œuvre consiste à utiliser une ressource d'énergie fossile, en grande partie du gaz naturel même si certains pays tels que la Chine peuvent encore utiliser du charbon. Le gaz naturel (CH_4) va servir à la fois de source d'énergie et de matière première pour synthétiser de l'hydrogène. Lors de cette étape du CO_2 est émis vers l'atmosphère. L'hydrogène alimente ensuite le procédé Haber-Bosch, mis au point en Allemagne en 1913, qui permet de le combiner avec le diazote (N_2) présent dans l'air pour obtenir de l'ammoniac (NH_3). C'est cette partie du procédé qui va fortement évoluer avec la mise en place de nouvelles technologies sur des sites de production et le développement des engrais bas carbone.

La première technologie déployée est appelée CCS (Capture et stockage du carbone), elle permet la captation des émissions de CO_2 lors du procédé puis le stockage et/ou l'utilisation du CO_2 du carbone fossile afin qu'il ne soit pas émis vers l'atmosphère. Une fois ce procédé actif, il permet d'obtenir un hydrogène dit « bleu » qui permettra d'alimenter le procédé Haber-Bosch pour la production de l'ammoniac « bleu » (voir figure 10).



La deuxième technologie amenée à se développer, est la production d'engrais décarboné dit « vert ». Une source d'électricité renouvelable (hydroélectrique, éolienne, solaire) permet d'obtenir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau (H_2O) en remplacement du gaz naturel fossile ou l'utilisation du biométhane. Cet hydrogène « vert » se recombinera ensuite avec l'azote de l'air (N_2) dans le procédé Haber-Bosch. Le procédé pourra donc s'opérer quasiment sans ressource fossile et donc d'obtenir des engrais avec la plus faible empreinte carbone possible (voir figure 10).

Figure 10 : Comment fabrique-t-on des engrais bas carbone ? (Source : Yara)

Les 3 formes principales d'engrais azotés simples utilisées sur le marché français sont l'ammonitrate (45 %), la solution azotée (40 %) et l'urée (15 %). En France, le référentiel GESTIM+ (2020) permet de connaitre les facteurs d'émissions par défaut à la production des différents engrais minéraux (voir figure 11).

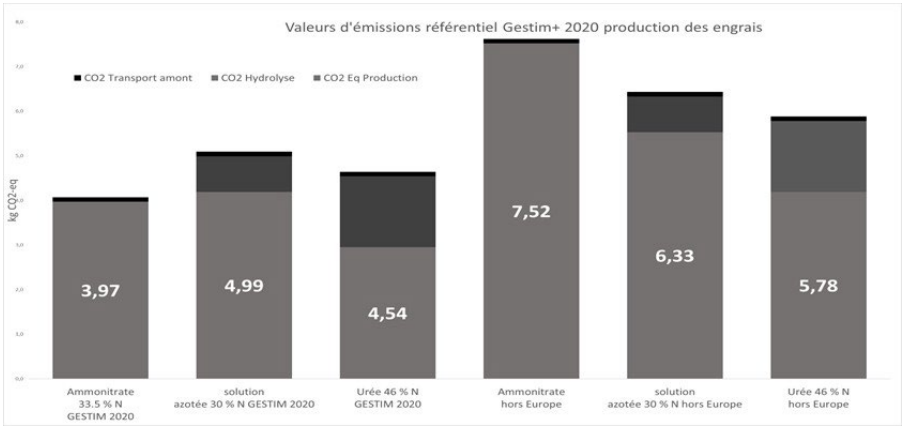


Figure 11 : Les formes d'azote selon les technologies de production : Europe vs hors Europe (source : Yara)

Les valeurs d'émissions moyennes, prenant en compte la provenance des engrais, sont respectivement de 3,97 kg CO2-eq/kg N pour l'ammonitrate 33,5, 4,54 kg CO_2 eq/kg N pour l'urée 46 %N et 4,99 kg CO_2-eq par kg N pour la solution azotée 30 % N. L'urée et la solution azotée sont des engrais très largement importés de l'extérieur de l'Union Européenne et pour lesquels, les conditions de production sont plus émettrices de GES qu'au sein de l'UE (GESTIM +, Fertilizers Europe 2014). Rappelons en outre que les facteurs d'émissions des engrais provenant des usines européennes sont souvent plus bas que les moyennes GESTIM+ selon les données de ce référentiel (voir figure 12).

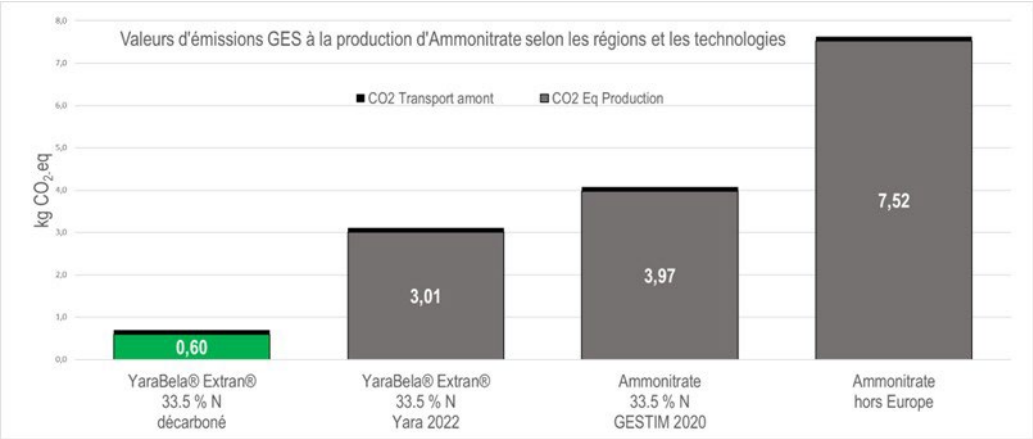


Figure 12 : Les valeurs d'émissions de GES à la production d'ammonitrate en fonction des zones de productions et des technologies de fabrication (source : Yara)

Pour l'usine Yara à Ambès, le facteur d'émissions certifié par l'organisme indépendant Det Norske Veritas (DNV) était de 3,01 kg CO_2 eq/kg N en 2022 avant les dernières améliorations apportées en 2024. La prise en compte des facteurs d'émissions certifiés (production) dans les analyses de cycle de vie et les bilans carbone des filières ou au niveau de l'exploitation agricole est devenue une vraie nécessité pour bien intégrer les progrès réalisés et à venir dans les usines de production.

Les démarches bas carbone commencent dès la production des engrais à l'usine, puis continuent via une utilisation optimisée de cet intrant lors de la production aux champs et devront correspondre aux attentes des filières agroalimentaires qui aujourd'hui avancent sur des projets de réductions de leur empreinte carbone.

Avec la réduction drastique des émissions à la production des engrais azotés (catalyse abattement N_2O, ammoniac bleu, ammoniac vert), le nouvel horizon de la décarbonation sera la réduction des émissions de N_2O au champ qui représenteront une part de plus en plus prépondérante des émissions totales (production et utilisation de l'engrais). L'optimisation de la fertilisation passe par le choix des formes d'azote les plus efficaces pour les cultures (comme indiqué dans la comparaison technico-économique du groupe technique Ada de l'Unifa en 2024), des doses ajustées aux besoins, le développement du pilotage, de la modulation de la dose et l'usage raisonnée d'inhibiteur de nitrification seront des leviers incontournables. C'est dans ce but d'optimisation que la méthode N-Tester® a été mise au point avec l'institut Arvalis à la fin des années 90. Aujourd'hui, cette démarche génère plus de 40 000 conseils de dose d'azote par an en France pour les agriculteurs pour adapter la fumure azotée en fin de cycle du blé.

3.4 Impact des engrais bas carbone dans la réduction de l'empreinte carbone de la production agricole et agro-alimentaire

Les différentes catégories d'engrais bas carbone ont pour but de réduire significativement l'empreinte carbone des productions agricoles qui ont besoin d'intrants azotés.

Les engrais azotés permettent d'optimiser les rendements et la qualité des récoltes, en ayant recours aux méthodes de calculs de besoins comme la méthode du bilan azoté Comifer et aux outils d'aides à la décision.

Prenons un exemple de calcul de l'empreinte carbone dans une région représentative de la production de blé tendre d'hiver en région Champagne–Ardennes (voir figure 13). Selon le panel Kynetec[3], la dose

[3] : panel de consommation d'engrais en France 2018 à 2022

apportée en moyenne est de 188 kg N/ha pour une culture de blé dont le rendement est de l'ordre 8,17 t/ha. Les engrais azotés sont de 3 formes différentes : 31,2 % d'ammonitrate, 65,3 % de solution azotée et 3,5 % d'urée. Si l'on utilise ces données et les pratiques moyennes pour les autres postes d'intrants utilisés sur cette culture, on voit que le poids de la fertilisation azotée représente 77 % de l'empreinte carbone du blé tendre d'hiver de cette région.

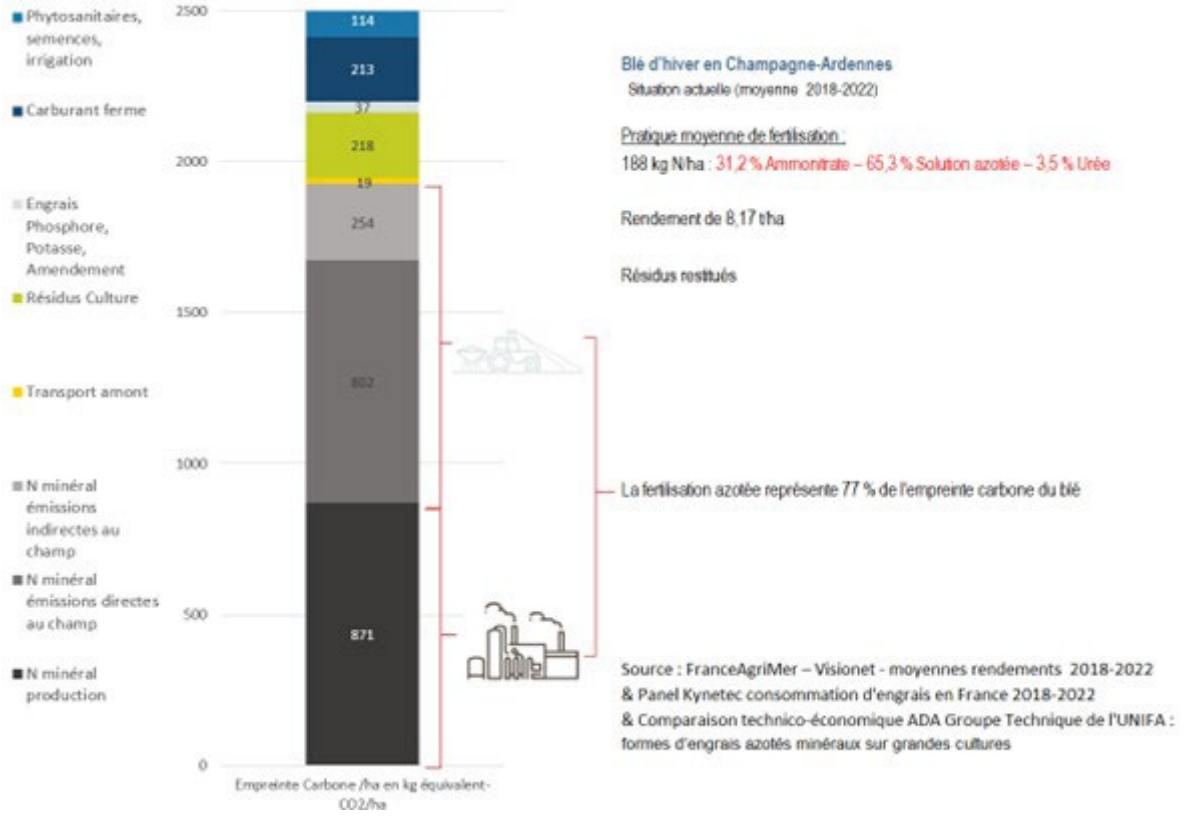


Figure 13 : Exemple d'empreinte carbone pour un blé tendre d'hiver en zone Champagne-Ardernnes (sources : données Gestim+, panel Kynetec et données FranceAgriMer Visionet).

Cela met en évidence l'intérêt d'optimiser ce poste d'émission. Il est important d'identifier les facteurs d'émission des différentes formes d'azote qui sont employées par les agriculteurs.

Si les pratiques évoluent en utilisant la forme d'engrais la moins émissive en termes de GES, cela permet d'améliorer de 6 % l'empreinte carbone à l'hectare et de 10 % à la tonne de blé produite car l'efficacité des formes d'azote fait aussi progresser le rendement de 81,7 à 85,8 q/ha. Les sites de productions Yara ayant souvent des facteurs d'émissions inférieurs à la référence Gestim+, la diminution atteindrait 12 % à l'hectare et 16 % par tonne de blé produite. L'engrais bas carbone permettra d'abaisser l'empreinte de 31 % par hectare et 34 % par tonne de blé produite (voir figure 14).

Hypothèses		Actuel	Etape 1	Etape 2	Etape 3
Rendement (q/ha)		81,7	85,8 (+5%)	85,8 (+5%)	85,8 (+5%)
N	N (kg/ha)	188			
	Ammonitrate (%)	31,2	100 % Gestim+	100 % Yara	Bas carbone
	Solution azoté (%)	65,8	-	-	-
	Urée (%)	3,5	-	-	-

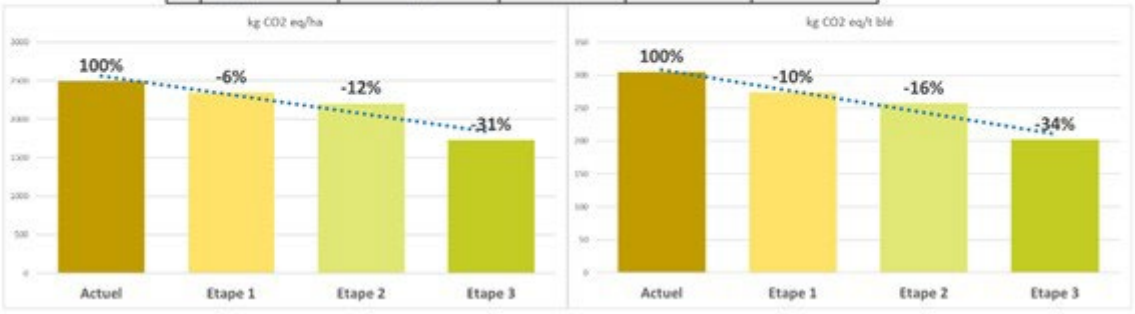


Figure 14 : Hypothèses d'évolution de pratiques culturales et de leurs effets sur l'empreinte carbone pour un blé tendre d'hiver en zone Champagne-Ardennes (source Yara).

Conclusion

Les différentes innovations technologiques de production des engrais minéraux azotés, mises en place depuis 2005, ont permis de réduire fortement les Emissions de GES de la production d'ammoniac en partant de la technique Haber Bosch jusqu'à la mise en place de la technologie catalytique pour abattre les émissions de N_2O de la production d'acide nitrique dans les procédés de fabrication des engrais contenant du nitrate.

Les prochaines évolutions vont amener à réduire les émissions de CO_2 vers l'atmosphère en utilisant les techniques de CCS et en utilisant des ressources énergétiques renouvelables ou faiblement carbonées.

Les objectifs Yara de réduction des émissions pour aller vers la neutralité carbone en 2050 ont été fixés (voir figure 15) en visant -10 % d'ici 2025 et -30 % en 2030 en prenant en compte les scope 1 et 2. Concernant le scope 3 Yara vise une baisse de 11 % en l'état des références des champs d'application d'émissions spécifiques liés à prise en considération du CO_2 de l'urée ou non dans le scope 3 par exemple.

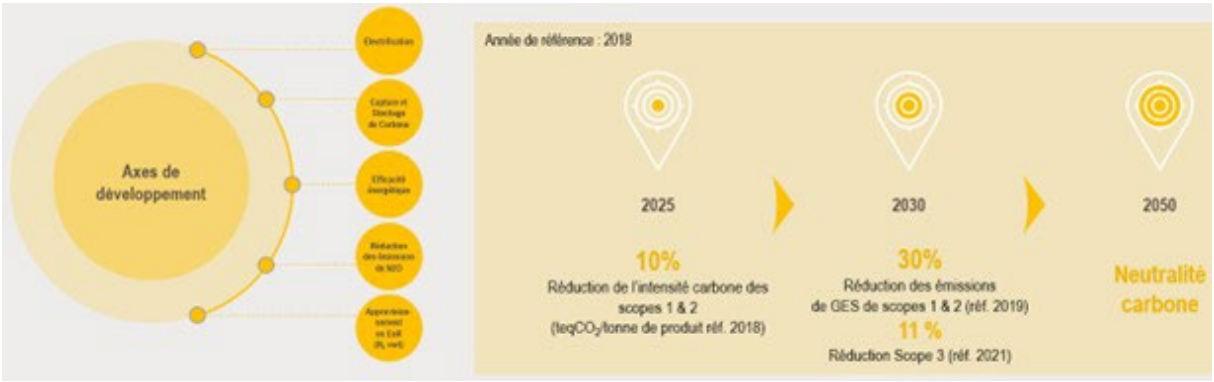


Figure 15 : Objectifs Yara en vue de la neutralité carbone en 2050 (source Yara)

Si l'on prend pour référence les émissions de 2005, la fabrication d'engrais bas carbone permettra de réduire les émissions de GES jusqu'à 90 % à la production. Les engrais azotés ont pour but de répondre aux besoins des cultures qui seront utilisées directement ou indirectement par les filières agroalimentaires.

Le recours à des engrais bas carbone en agriculture aura un effet sur les autres maillons qui pourront réduire également leur empreinte jusqu'à 30 % pour la production des cultures et jusqu'à 20 % dans l'agroalimentaire (figure 16).

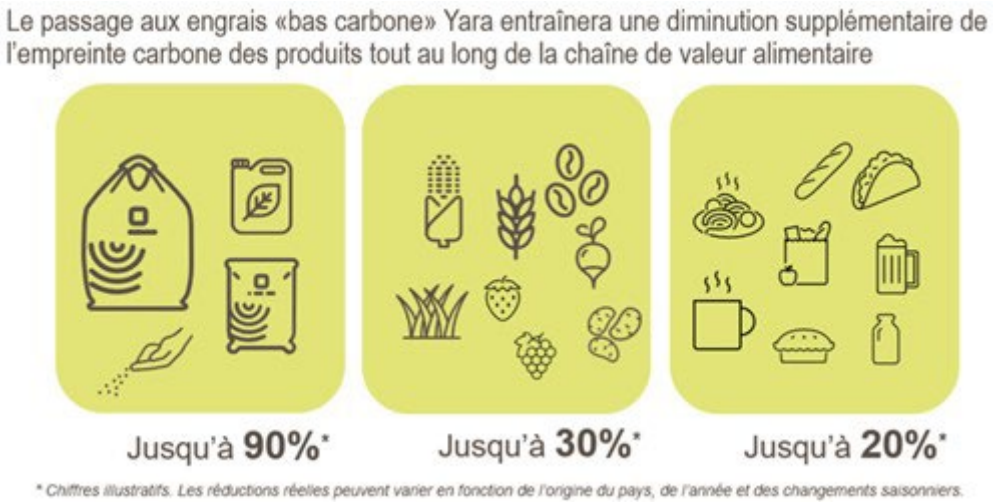


Figure 16 : Réduction de l'empreinte carbone des engrais, des cultures et des produits alimentaires (source Yara)

Éthique

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

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

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

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

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

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas ne travailler, ne 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

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui a participé à l'élaboration de cet article qui a vu le jour suite à l'intervention lors du Carrefour de l'innovation du 19 septembre 2024 à Bordeaux Sciences Agro. Cette intervention a été initiée par Lionel Jordan-Meille qui avait identifié la société Yara comme étant pertinente et avec des exemples locaux d'innovation sur les technologies bas carbone. Le sujet de l'empreinte carbone est important dans notre activité et l'ensemble de ce travail a été réfléchi, structuré et mis au point avec la collaboration de Sophie Agasse (Environmental Transition, Planification & Prospective Senior Manager) et Marc Lambert (Agronomy Solutions Manager).

Merci aussi l'ensemble des personnes qui ont participé la rédaction de cet article, la production de données, à la création des illustrations et la relecture.

Références bibliographiques

FranceAgriMer, (2025). Données & Chiffres > productions végétales > grandes cultures > surfaces. https://visionet.franceagrimer.fr/pages/Statistiques.aspx?menuurl=Statistiques/productions%20vegetales/grandes%20cultures/surfaces,productions,rendements.

Ministère de la transition écologique, (2022). Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/methodo_BEGES_decli_07.pdf.

Recous S., Jeuffroy M.-H., Hénault C., Bamière L. (2015). Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N_2O à l'échelle France ? 13p

Tailleur A. et Gac A. (2020). GES'TIM+ Référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air. Version 1.2. 517p.

Unifa, (2024). COMPARAISON TECHNICO-ÉCONOMIQUE des principales formes d'engrais azotés minéraux sur grandes cultures. https://www.unifa.fr/sites/default/files/2024-12/resume-etude-technico-economique-forme-engrais-mineraux-gt-ada-unifa-mise-a-jour-2024.pdf

Yara France, (2023). A propos de Yara, https://www.yara.fr/a-propos-yara/.

Yara France, N tester® : optimisez votre rendement. https://www.yara.fr/fertilisation/outils-et-services/n-tester/.

Yara France, (2022). Yara, acteur de la décarbonation de l'agriculture | Yara France, https://www.yara.fr/fertilisation/blog/decarbonation/.

Yara International ASA, (2023). Yara Integrated Report 2023. https://www.yara.com/siteassets/investors/057-reports-and-presentations/annual-reports/2023/yara-integrated-report-2023.pdf2023.

Pour citer cet article : Cédric Boudes. Les engrais bas carbone : un levier de réduction des émissions de GES des filières agricoles. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.28-39. 10.17180/ciag-2025-vol102-art03

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.

La réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie agroalimentaire : Enjeux, leviers et perspectives

Sébastien CURET[1], Hugo BONZANO[2]

[1] Oniris, Nantes Université, CNRS, GEPEA, UMR 6144, 44000 Nantes, France

[2] OID Consultants, 6c Cours Bayard, 69002 Lyon, France

Correspondance : sebastien.curet@oniris-nantes.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art04

Cet article est issu d'un atelier sur le thème de la réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie agro-alimentaire qui s'est tenu lors du Carrefour de l'Innovation Agronomique (CIAG) le 19 septembre 2024 à Bordeaux Science Agro (CIAG « Empreinte carbone - trajectoires pour les activités agricoles et agroalimentaires »).

Résumé

En France, les industries agroalimentaires (IAA) consomment une quantité importante d'énergie liée aux processus industriels de transformation des denrées alimentaires. Ces industries sont aussi caractérisées par un impact environnemental indirect de leurs activités du fait des transports des aliments ou encore les emballages des produits. Afin d'évaluer ces impacts environnementaux, le Bilan Carbone® est un outil puissant permettant de quantifier les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre (GES) liées à l'activité d'une organisation. Dans ce contexte, la réduction des GES du secteur agroalimentaire est un objectif stratégique. Plusieurs leviers technologiques comme la réduction des pertes matière ou l'utilisation de la chaleur fatale industrielle peuvent impacter positivement le Bilan Carbone® d'une industrie. Ces leviers technologiques sont à mettre en relation avec les outils méthodologiques de gestion des flux de production dans une usine et doivent aussi être considérés au regard des réglementations évolutives imposées par les pouvoirs publics (loi anti-gaspillage pour une économie circulaire sur les emballages par exemple). Par des actions ciblées et une implication de tous les acteurs, il est possible de limiter ces impacts et de favoriser une production alimentaire plus respectueuse de l'environnement. La transition bas carbone nécessite ainsi une approche systémique, combinant innovations technologiques, organisationnelles et stratégiques.

Mots-clés : Bilan Carbone®, industrie agroalimentaire, leviers technologiques et organisationnels

Abstract: Greenhouse gas reduction in the agrifood industry: Challenges, levers and prospects

In France, the food processing industry consumes a significant amount of energy for the transformation processes dedicated to food products. These industries are also characterized by the indirect environmental impact of their activities, due to food transport and product packaging. To assess these environmental impacts, the carbon footprint methodology is a powerful tool for quantifying the direct and indirect greenhouse gas (GHG) emissions associated with the activity of the organization. In this context, reducing GHG emissions in the agri-food sector is a strategic objective. Several technological levers, such as the reduction of material losses or the energy recovery within industrial processes, can have a positive impact for the carbon footprint of industry. These technological levers need to be considered in conjunction with the methodological tools used to manage production flows in a factory, and must also be seen in the light of evolving regulations imposed by public authorities (anti-waste law for a circular economy for example). Through targeted action and the involvement of all stakeholders, it is possible to limit these impacts and promote more environmentally friendly food production. The low-carbon transition thus requires a systemic approach, combining technological, organizational and strategic innovations.

Keywords: carbon footprint, food industry, technological and organisational levers

1. Contexte

L'industrie agroalimentaire (IAA) est l'un des secteurs économiques dont l'impact environnemental est majeur, notamment au regard de ses émissions de gaz à effet de serre (GES). Cette industrie transforme des produits bruts et se situe en aval de la production agricole. Avant que les produits ne soient distribués pour la consommation, plusieurs niveaux de transformation sont concernés. Selon l'Ademe (2024a), cette phase de transformation alimentaire génère plus de 9 millions de tonnes d'équivalent CO_2 (Mt CO_2e), représentant 5,5 % des émissions du secteur alimentaire en France.

La production industrielle de denrées alimentaires repose sur des processus souvent consommateurs d'énergie, avec l'utilisation de combustibles fossiles. Les principales sources d'émissions de GES directes des IAA proviennent essentiellement de la consommation d'énergie nécessaire aux processus de transformation ainsi qu'aux systèmes de réfrigération utilisés pour la conservation des aliments. Cette industrie constitue donc un levier essentiel dans la lutte contre le réchauffement climatique. Parmi les sous-secteurs les plus impactant, les sucreries figurent en bonne place avec environ 3 % des émissions industrielles de GES en France (Ademe, 2024b). Les transformations opérées dans ces industries nécessitent des quantités considérables d'énergie et d'eau, générant ainsi une empreinte carbone significative.

Face aux impératifs de transition écologique, la réduction des émissions de GES dans les IAA apparaît comme un enjeu stratégique pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Cet objectif repose sur la mise en place de stratégies innovantes et durables et doit passer par l'amélioration de l'efficacité énergétique des processus industriels, l'adoption de sources d'énergies renouvelables ou encore la valorisation des coproduits issus de la production alimentaire. Les avancées technologiques telles que l'électrification des procédés thermiques ou l'utilisation de biomasse offrent aussi des perspectives prometteuses pour réduire significativement l'impact carbone du secteur.

2. Méthodologie et calcul des émissions de GES

Le calcul des émissions de GES repose sur une méthodologie rigoureuse, structurée en plusieurs étapes. Entrée en vigueur en 2004, la méthodologie Bilan Carbone® (version 9, depuis le 1er janvier 2025) sert de guide de référence pour instaurer une démarche d'amélioration continue et assurer un reporting précis des émissions de GES. Cette approche permet d'évaluer l'empreinte carbone d'une activité, d'une entreprise ou d'un produit. Elle permet d'affiner la comptabilité carbone grâce à une analyse stratégique de l'organisation et met en avant les meilleures pratiques pour élaborer un plan de transition efficace (Ademe, 2024a). A titre d'exemple, dans le secteur agroalimentaire, la quantification des émissions liées aux intrants est déterminée par un calcul basé sur la masse des aliments utilisés associée à un facteur d'émission (équivalent CO_2/kg) spécifique à chaque produit. Certaines matières premières ont une empreinte carbone plus faible que d'autres et l'utilisation de matières premières alternatives peut jouer un rôle crucial dans la réduction des émissions de GES. Cependant, bien que la méthode Bilan Carbone® soit reconnue et largement adoptée, elle comporte une marge d'incertitude. Cette imprécision s'explique par la variabilité des données disponibles, les fluctuations des facteurs d'émission, ainsi que les hypothèses prises en compte lors des calculs. En outre, l'élaboration d'un Bilan Carbone® complet est un processus long et exigeant (plusieurs mois pour recueillir, analyser et interpréter toutes les données nécessaires), ce qui peut représenter un véritable défi pour certaines organisations.

3. Leviers pour réduire les émissions de GES

3.1. Emissions directes

Les émissions directes comprennent toutes les émissions produites directement par l'activité de l'entreprise. Elles incluent, par exemple, la consommation énergétique des bâtiments, l'utilisation de

combustibles fossiles comme le gaz naturel, ainsi que les émissions liées au transport via la flotte de véhicules du site industriel. De plus, elles prennent en compte les modifications d'usage des sols, telles que la déforestation ou la conversion de terres agricoles au profit d'activités industrielles qui peuvent libérer des quantités importantes de CO_2 dans l'atmosphère.

Deux leviers sont identifiés pour réduire les émissions de GES dans les IAA. Tout d'abord, une meilleure gestion des flux de production permet de limiter les pertes matière et ainsi de réduire l'empreinte carbone. Selon FAO (2019), environ un tiers des aliments produits dans le monde est perdu ou gaspillé, contribuant significativement aux émissions de gaz à effet de serre. Outre son impact sur les émissions directes, la réduction des pertes matière permet aussi de limiter l'impact carbone des intrants agricoles, notamment en réduisant la pression sur les ressources naturelles.

Un autre levier concerne la valorisation de la chaleur fatale industrielle. La récupération de la chaleur produite par ces procédés industriels permet de l'utiliser pour d'autres usages énergétiques, réduisant ainsi le recours à des sources d'énergie fossile (Ademe, 2024a). Ainsi, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments industriels, notamment grâce à l'installation de systèmes de récupération de chaleur ou à l'utilisation d'énergies renouvelables, peut contribuer à la réduction des émissions directes. Cette approche s'intègre dans une logique d'optimisation énergétique des procédés industriels. A titre d'exemple, en Pays de la Loire, 800 GWh/an d'énergie thermique est récupérable soit 15,4 % du gisement de chaleur fatale en Pays de la Loire (Ademe, 2025). L'effacement de consommation électrique caractérisé par l'organisation de pauses dans la consommation énergétique d'une industrie pendant les pics de demande peut aussi permettre de limiter indirectement le recours aux énergies fossiles en facilitant la gestion du réseau électrique.

3.2. Emissions indirectes

Les émissions indirectes englobent l'ensemble des émissions associées aux activités de l'entreprise, mais qui ne sont pas directement produites par celle-ci. Elles comprennent notamment les émissions liées à la production des matières premières, la distribution des produits finis, ainsi que les déplacements des employés et des clients. Dans le secteur de l'agriculture et l'agroalimentaire, ces émissions indirectes peuvent représenter plus de 80 % du total des émissions (Ademe, 2024a). Cette proportion considérable souligne l'importance de prendre en compte ces facteurs dans les stratégies de réduction de l'empreinte carbone.

Le transport et les emballages des denrées alimentaires constituent des éléments majeurs des émissions indirectes. En effet, le transport des produits alimentaires depuis leur lieu de production jusqu'à leur point de vente, voire jusqu'au domicile des consommateurs, génère d'importantes émissions de CO_2, en particulier lorsque les modes de transport utilisés utilisent des carburants d'origine fossile. L'empreinte carbone liée au transport des denrées alimentaires représente 19 % des émissions de GES associées à l'alimentation (pourcentage incluant les trajets longue distance liés aux importations, les transports métropolitains ainsi que les déplacements des ménages pour leurs achats alimentaires). En ce qui concerne l'empreinte énergétique, elle se répartit de manière plus équilibrée sur l'ensemble de la chaîne agroalimentaire, avec une part dominante de 31 % attribuée au transport (Ademe, 2019).

L'optimisation des chaînes logistiques peut permettre de diminuer la distance parcourue par les produits alimentaires et ainsi réduire les émissions associées au transport. De plus, le passage à des modes de transport plus durables, tels que le ferroviaire ou l'électrification des flottes de livraison, peut être une solution efficace. L'augmentation du taux de chargement des camions et l'adoption de solutions de transport moins émissives (ex. voiliers cargos) contribuent aussi à limiter l'empreinte carbone du transport des marchandises (Green Logistics, 2015).

Les emballages alimentaires, bien qu'essentiels pour la conservation et la protection des aliments, peuvent avoir un impact environnemental significatif. La fabrication, le recyclage et l'élimination des

emballages contribuent ainsi à l'empreinte carbone globale du secteur agroalimentaire. Concevoir des solutions d'emballage plus respectueuses de l'environnement, tout en respectant les normes sanitaires, est un levier clé pour réduire les déchets plastiques et les émissions associées à leur production et leur élimination (Khandeparkar *et al*., 2024). Ainsi, l'utilisation de matériaux recyclables, biodégradables ou réutilisables est une piste intéressante pour limiter l'impact environnemental. D'autres actions peuvent également être menées au niveau des intrants. La sélection de matières premières issues de l'agriculture biologique ou de circuits courts peut réduire les émissions liées à leur production et à leur transport (Sustainable Food Supply Chains, 2019).

3.3. Leviers organisationnels

La méthode MFCA (Material Flow Cost Accounting) ou comptabilité des flux matière est une approche innovante de gestion des flux de matières qui vise à améliorer l'efficacité pour l'utilisation des ressources dans une organisation. Initialement développée au Japon, elle est devenue une norme internationale sous la référence ISO 14051. Cette méthode aide les entreprises à optimiser leurs coûts et à réduire leur impact environnemental en identifiant les étapes de fabrication où les gains potentiels sont les plus significatifs. Elle permet d'identifier les pertes matières et de réduire les émissions de GES. Elle permet aussi d'évaluer les coûts globaux liés aux déchets et aux produits à chaque phase du processus de production. Cette approche prend en compte divers facteurs tels que les matières premières, l'énergie, la main-d'œuvre, l'amortissement des équipements et la gestion des déchets. Ainsi, la méthode MFCA constitue un levier efficace pour réduire les coûts tout en améliorant la performance environnementale de l'entreprise (Bux et Amicarelli, 2022).

3.4. Problématiques réglementaires

Instaurée par la loi Grenelle II en 2010, l'obligation de réaliser un Bilan Carbone® concerne les entreprises privées de plus de 500 salariés (et 250 en outre-mer), avec une exigence de mise à jour tous les quatre ans. Cette méthodologie doit ainsi être mise en place dans bon nombre d'organisations en complément d'actions en interne telles que l'optimisation des flux de production dans un contexte d'efficacité énergétique et de sobriété.

Promulguée en janvier 2020 en France, la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire vise à transformer les modèles de production et de consommation pour réduire les déchets et promouvoir une économie circulaire. Elle impose notamment des analyses de cycle de vie (ACV) pour évaluer l'impact des emballages plastiques et imposer des solutions plus durables. Ainsi, les nouvelles pratiques doivent s'accorder avec les normes sanitaires et les contraintes logistiques, notamment dans les IAA où l'adoption de bouteilles en verre réutilisables est une option viable mais avec des défis logistiques à relever.

4. Bilan et perspectives

La réduction des émissions de GES dans les IAA requiert une approche globale et collaborative, mobilisant les acteurs tout au long de la chaîne de valeur. Afin de tendre vers une réduction des émissions de GES, trois idées-forces sont identifiées :

4.1. Levée des freins humains et culturels : sensibiliser les industriels à l'importance d'une transition durable.

La réduction des émissions de GES dans les IAA se heurte à plusieurs obstacles, principalement d'ordre humain. En effet, tous les acteurs du secteur ne perçoivent pas l'intérêt d'un changement de pratiques, souvent freiné par son coût immédiat, sans bénéfice économique direct à court terme. Par ailleurs, des freins externes existent également, qu'ils soient d'ordre réglementaire ou liés aux politiques publiques. Un autre défi identifié par les industriels est souvent le manque de dispositifs de mesures physiques facilitant l'accès aux données de consommation par poste de travail (eau et énergie notamment).

4.2. Nécessité du Bilan Carbone® : Un outil essentiel pour orienter les stratégies de réduction des émissions.

Cet outil permet de quantifier les émissions et d'identifier les leviers et innovations à déployer pour réduire les impacts environnementaux, qu'ils soient directs ou indirects. Parmi les solutions possibles : la diminution du gaspillage alimentaire, la décarbonation et l'électrification des sources d'énergie, ainsi que l'utilisation de matières premières moins impactantes.

La méthodologie Bilan Carbone® offre une vision globale et encourage les différents acteurs à réaliser des bilans énergétiques plus détaillés. Il constitue ainsi la première étape vers l'élaboration d'un plan d'action global, nécessitant une collaboration entre les divers services de l'entreprise. Dans cette optique, la démarche de responsabilité sociétale des entreprises (RSE) joue un rôle clé pour repenser les modes de fonctionnement et le modèle économique.

4.3. Sensibilisation des acteurs : Engager les collaborateurs et partenaires à travers des actions concrètes et progressives.

La sensibilisation de tous les acteurs de la chaîne alimentaire est un préalable incontournable. L'adhésion au plan d'action par l'ensemble de la filière est essentielle, car des solutions existent, mais leur mise en œuvre peut parfois s'avérer complexe. Ce frein social peut être surmonté en adoptant une approche progressive : de petites initiatives peuvent ouvrir la voie à des changements plus significatifs. Une sensibilisation accrue des consommateurs et des acteurs du secteur est essentielle pour favoriser une transition vers des pratiques plus durables. En adoptant des comportements responsables, comme la réduction du gaspillage alimentaire, la préférence pour des produits locaux ou encore le choix d'aliments avec un faible impact carbone, chacun peut participer à la lutte contre le changement climatique. De leur côté, les entreprises peuvent renforcer leurs engagements en matière de transparence en fournissant aux consommateurs des informations claires sur l'empreinte carbone de leurs produits, facilitant ainsi des choix éclairés.

Cette transition vers une industrie alimentaire plus durable se heurte à plusieurs obstacles. Les freins culturels, liés aux habitudes de consommation et aux résistances internes des acteurs économiques, limitent parfois l'adoption de pratiques plus vertueuses. Par ailleurs, les contraintes réglementaires et les normes environnementales en constante évolution peuvent constituer un défi pour les entreprises souhaitant s'adapter rapidement aux nouvelles exigences. La mise en œuvre de solutions efficaces nécessite donc une coopération accrue entre les pouvoirs publics, les industriels et les consommateurs afin d'encourager des pratiques plus durables et accélérer l'adoption de modèles de production à faible empreinte carbone.

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

Sébastien CURET : https://orcid.org/0000-0001-6625-2903

Contributions des auteurs

Sébastien Curet : conceptualisation, rédaction, mise en forme

Hugo Bonzano : relecture, expertise conseil

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient les étudiants de Bordeaux Science Agro pour leur participation active et la restitution des échanges suite à l'atelier du CIAG « *Empreinte carbone - trajectoires pour les activités agricoles et agroalimentaires* ».

Références bibliographiques

Ademe (2024a), Réalisation d'un bilan des émissions de gaz à effet de serre, Guide sectoriel 2024, filière agricole et agroalimentaire. https://librairie.ademe.fr/changement-climatique/7206-realisation-d-un-bilan-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-pour-la-filiere-agricole-et-agroalimentaire.html, page consultée le 25 février 2025

Ademe (2024b), Sucre (rapport de synthèse), Plan de transition sectoriel de l'industrie du sucre en France, https://librairie.ademe.fr/energies/7475-plan-de-transition-sectoriel-du-sucre-en-france-rapport-de-synthese.html, page consultée le 25 février 2025

FAO (2019), La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture, aller plus loin dans la réduction des pertes et gaspillages des denrées alimentaires, https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/090695a9-56e0-489a-a29b-8f3ba7c88bfa/content, page consultée le 25 février 2025

Ademe (2025), La chaleur fatale en Pays de la Loire : focus sur les industries laitières, https://librairie.ademe.fr/energies/8237-10009-la-chaleur-fatale-en-pays-de-la-loire-focus-sur-les-industries-laitieres.html, page consultée le 25 février 2025

Ademe (2019), "1/4 de l'empreinte carbone des Français est liée à l'alimentation", https://www.ademe.fr/presse/communique-national/sia2019-etude-1-4-de-lempreinte-carbone-des-francais-est-liee-a-lalimentation/, page consultée le 25 février 2025

Green Logistics (2015) 3rd ed. Kogan Page.

A. S. Khandeparkar, R. Paul, A. Sridhar, V. V. Lakshmaiah, P. Nagella (2024), Eco-friendly innovations in food packaging: A sustainable revolution, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Volume 39, 101579

Sustainable Food Supply Chains, Planning, Design, and Control through Interdisciplinary Methodologies (2019), Academic Press, Elsevier

C. Bux, V. Amicarelli (2022), Material flow cost accounting (MFCA) to enhance environmental entrepreneurship in the meat sector: Challenges and opportunities, Journal of Environmental Management, Volume 313, 115001.

Pour citer cet article : Sebastien Curet, Hugo Bonzano. La réduction des gaz à effet de serre dans l'industrie agroalimentaire : Enjeux, leviers et perspectives. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.40-45. 10.17180/ciag-2025-vol102-art04

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.

La gestion de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux : où en est-on ? Quelles innovations en faveur d'une trajectoire de réduction de l'émission de gaz à effet de serre ?

Gabrielle BASSET[1], Yannick SCHAFER[1], Martine BABO[1], Inès LAIRD[1], Paul MAZERAND[2] et Philippe PREVOST[3]

[1] Bordeaux Sciences Agro, 1, cours du Général de Gaulle, 33170 Gradignan, France

[2] Terres en villes, 22, Rue Joubert, 75009 Paris, France

[3]Alliance Agreenium, 42, rue Scheffer, 75016 Paris, France

Correspondance : philippe.prevost@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art05

Résumé

Dans une visée de réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux, les projets alimentaires territoriaux (PAT), en France, proposent de plus en plus d'actions favorisant la transformation des systèmes agricoles *et al*imentaires pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Un atelier participatif a permis de mettre en perspective ces actions et d'analyser les conditions favorisant une accélération des transitions agricole *et al*imentaire en cours.

Mots-clés : Projets alimentaires territoriaux, Plan climat air énergie territorial, atténuation du changement climatique

Abstract

With the aim of reducing the carbon footprint of local food systems, local food projects (PAT) in France are increasingly proposing actions to transform agricultural and food systems in order to mitigate and adapt to climate change. A participatory workshop provided an opportunity to put these actions into perspective, and to analyze the conditions favoring an acceleration of the agricultural and food transitions underway.

Keywords: Territorial food projects, territorial climate air and energy plan, climate change mitigation

1. Introduction

La réduction de l'empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires, comme pour tous les autres secteurs d'activité, est une nécessité au regard des risques majeurs créés par le dérèglement climatique. Mais une contribution forte de l'agriculture à la neutralité carbone dans la société dépend de nombreuses conditions qu'il faut pouvoir caractériser pour mieux orienter les systèmes d'innovation dans une trajectoire la plus favorable.

Dans le cadre du Carrefour de l'innovation agronomique « Réduction de l'empreinte carbone dans les activités agricoles et agroalimentaires » du 19 septembre 2024, une série d'ateliers a été organisée afin (i) d'analyser les potentiels de réduction de l'empreinte carbone des activités agricoles et/ou agro-alimentaires, (ii) d'identifier les leviers et les freins pour une trajectoire la plus favorable possible à la neutralité carbone à l'échelle sociétale, et (iii) d'identifier les systèmes d'innovation nécessaires pour cette trajectoire.

Le texte ci-après rend compte des travaux de l'atelier concernant le potentiel de réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux.

A partir du témoignage de l'Association Terres en villes, qui anime le réseau national des projets alimentaires territoriaux (RNPAT[4]), et qui fait le point sur les travaux en cours sur la prise en compte de l'empreinte carbone par les PAT, les membres d'un atelier participatif se sont attachés à discuter deux questions :

1. Quelles sont les conditions requises et les actions prioritaires pour une trajectoire la plus favorable possible à la neutralité carbone au sein des systèmes alimentaires territoriaux, à échéance 2030 et à échéance 2050 ?
2. Quels sont les systèmes d'innovation nécessaires pour cette trajectoire : objets, acteurs, démarches ?

L'Atelier était composé de vingt personnes, représentants de coopératives et de collectivités territoriales, agents de développement, chercheurs, enseignants et étudiants.

2. La gestion de l'empreinte carbone au sein des systèmes alimentaires territoriaux : l'exemple des Projets alimentaires territoriaux

L'approche présentée ici se situe dans la rencontre des travaux du réseau Terres en villes et du projet inter-ONVAR PLAACE. Terres en villes est l'association qui met en réseau 25 territoires d'agglomérations et métropoles, avec deux membres par territoire, la collectivité et la chambre d'agriculture. L'objet de l'association est d'accompagner ses membres dans la co-construction et la mise en œuvre partagée de leurs politiques agricole *et al*imentaire. Initialement, l'association travaillait principalement sur l'agriculture (péri)urbaine (la co-construction et mise en œuvre des politiques agricoles des territoires d'agglomération, principalement sur le pourtour des villes). Elle a évolué en incluant également l'alimentation depuis 2010-2015. Du fait de cette évolution, depuis 2015, Terres en villes anime, en copilotage avec Chambres d'agriculture France, le réseau national des projets alimentaires territoriaux, qui est devenu France PAT en 2023. Terres en villes étant Organisme national à vocation agricole et rurale (ONVAR) depuis 2015, l'association est engagée depuis 2022 dans un projet Inter-ONVAR, financé par les fonds CASDAR, piloté par la Coopération agricole intitulé PLAACE : Pour L'Amplification des Actions des Agriculteurs en faveur du Climat et des Écosystèmes[5]. Ce projet a réuni pendant deux ans neuf ONVAR pour travailler sur les enjeux du changement climatique et de l'accompagnement des agriculteurs face à ses effets, et dans la mise en place des actions permettant la lutte contre les émissions de gaz et de serre à l'échelle de leurs exploitations agricoles. C'est dans le cadre de ce projet que se situent les travaux de Terres en villes ci-après.

2.1. Les Plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET) et les projets alimentaires territoriaux (PAT), deux dispositifs de politiques publiques permettant de travailler sur l'empreinte carbone au sein des systèmes alimentaires territoriaux

Pour aborder la gestion de l'empreinte carbone au sein des systèmes alimentaires territoriaux, nous nous intéressons au rôle des collectivités territoriales et notamment sur les dispositifs ou outils de politiques publiques dont elles disposent. Les deux outils principaux sont les Plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET) (ADEME, 2024), où la place de l'agriculture est essentielle, et les projets alimentaires territoriaux (PAT) (France PAT, 2024), où l'agriculture et le changement climatique ont pris un rôle important.

Pour resituer les liens entre collectivité, agriculture, alimentation et climat, il faut comprendre que les collectivités territoriales ne peuvent pas « faire ce qu'elles veulent » : elles doivent intervenir dans le cadre de compétences juridiques qui leurs sont attribuées notamment par la loi NOTRE, et de dispositifs de politiques publiques, obligatoires ou volontaires qui vont leur servir de vecteurs. Les

[4] https://france-pat.fr/

[5] Voir la synthèse des travaux à télécharger à partir du lien Projet PLAACE

collectivités n'ont de compétences spécifiques ni sur l'agriculture ni sur l'alimentation. Sur ces 2 thèmes, en lien avec le changement climatique, elles vont notamment pouvoir utiliser ces deux dispositifs, les PAT et les PCAET, avec des différences notables entre l'un et l'autre. Le premier, les plans climat-air-énergie territoriaux, est un dispositif obligatoire à l'échelle des intercommunalités de plus de 20 000 habitants. Il est très large : la collectivité qui doit lancer son PCAET doit notamment donner de grandes orientations sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre sur son territoire, et les secteurs concernés qui dominent sont l'habitat, l'énergie et les transports. L'agriculture reste un sujet, la plupart du temps, secondaire dans les PCAET.

Le second dispositif est le proj*et al*imentaire territorial qui lui est volontaire et peut être mobilisé à différentes échelles. Il est défini dans la loi d'Avenir de 2014 comme un projet rassembleur des acteurs intéressés par la question de l'alimentation. Ce projet se base sur un diagnostic territorial à travers lequel sont identifiés des besoins, suit une concertation avec les acteurs du territoire qui vise la mise en place d'une stratégie et d'un plan d'action pour mettre en œuvre des solutions concrètes en réponse à ces problématiques locales. Un dispositif de reconnaissance par le Ministère de l'agriculture de la souveraineté alimentaire et de la Forêt a été mis en place et distingue les PAT émergents, de niveau 1, et des PAT dits opérationnels de niveau 2. Les PAT peuvent être à l'initiative d'acteurs très différents mais la très grande majorité d'entre eux est dans les faits portée par les collectivités territoriales à différentes échelles, de la commune au département.

La marge de manœuvre est assez différente sur l'agriculture en comparaison avec les secteurs de l'énergie ou de l'habitat. L'un des exemples que l'on cite souvent est celui de l'habitat : c'est simple, ça peut coûter cher, mais on connait des solutions techniques et leurs résultats sont garantis : on fait une isolation et on atteint tout de suite l'objectif de 70% de réduction des émissions de gaz à effet de serre et on va les obtenir parce qu'il y a une étude qui dit ça, on va faire ça.

Sur l'agriculture, quand on peut viser 30% de diminution des émissions de gaz à effet de serre, c'est déjà très bien. On a plutôt des diminutions, en fonction des actions menées, de 15-20%, et encore, elles ne sont pas garanties parce qu'on travaille avec le vivant, et par ailleurs l'agriculture dépend de plein de facteurs, liés au climat, au sol, à la production...

La façon d'aborder l'agriculture et l'alimentation dans les plans climat-air-énergie territoriaux est très dépendante du contexte de chaque territoire. Par exemple, l'agriculture sur Rennes Métropole représente 15% des émissions de gaz à effet de serre. Sur Grenoble Alpes Métropole, elle n'en représente que 1%. On a deux contextes complètement différents, des productions complètement différentes (élevage laitier intensif / élevage extensif de montagne). Rennes Métropole est pionnier au niveau du Réseau Terres en villes sur la place de l'agriculture dans les PCAET. Il y a déjà de gros travaux qui sont faits, tandis qu'à Grenoble Alpes Métropole, alors qu'ils sont très en avance sur de nombreux sujets dans leurs politiques agricoles *et al*imentaires locales, ils sont au démarrage de leur réflexion sur leur PCAET. Pour la collectivité de Grenoble, les émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture ne sont pas vraiment prioritaires : la collectivité ne va pas mettre en œuvre de gros moyens pour réduire 1% des émissions de gaz à effet de serre agricoles, et elle va plutôt privilégier d'autres actions.

Le dispositif des projets alimentaires territoriaux (PAT) est devenu l'outil de politique publique de nombreuses collectivités pour travailler sur l'agriculture et l'alimentation. Comme le PAT est volontaire et inclut la mise en place d'actions opérationnelles avec les acteurs du territoire, il sert souvent de test pour mettre en place des actions dans le PCAET à venir ou en cours de réflexion. Ou vice-versa, le PAT constitue la partie opérationnelle permettant de décliner un PCAET sur l'agriculture et l'alimentation, lui donner un caractère concret de terrain.

2.2. De nombreuses actions concrètes sur le terrain mais un besoin de passer à la vitesse supérieure

Ces dispositifs se traduisent sur le terrain en actions de réductions des émissions de gaz à effet de serre, d'atténuation du changement climatiques, mais aussi en actions d'adaptation au changement climatique.

En amont des actions, des outils de diagnostic permettent directement la concertation, la sensibilisation voire le passage à l'action : par exemple l'outil ClimAgri mis en place par Solagro et porté par l'ADEME (2011). Cet outil permet un diagnostic des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'un territoire et surtout de proposer des projections d'évolution à partir de scenarii. Il est important car à partir de données chiffrées il va permettre de faire dialoguer les acteurs entre eux et ainsi certains vont pouvoir s'engager sur des évolutions de leurs pratiques. De même, on trouve de nombreux diagnostics sectoriels, par filière ou types de productions. Les outils territoriaux devront se coordonner avec ces derniers.

Il y a également différents outils qui vont permettre de mêler des débuts de diagnostic (moins précis) avec de la prospective dans un but de sensibilisation. On a ainsi les différentes fresques du climat, du sol, de la biodiversité, … le site Territoires Fertiles mis en place par les Greniers d'abondance, Le Basic, Terre de liens, la FNAB… Ces outils visent la mise en mouvements de différentes catégories d'acteurs, et notamment les élus des collectivités.

Concernant les actions en lien avec des changements de pratiques en agriculture, il y a souvent un accompagnement par des organismes de développement agricole, et parfois dans le cadre de conventions avec les collectivités, avec l'objectif d'adaptation ou d'atténuation au changement climatique. Cela peut se faire dans le cadre de dispositifs comme les paiements pour services environnementaux (PSE) ou des périmètres de protection et de mise en valeur des espaces naturels périurbains (PAEN), un dispositif de protection des espaces agricoles doublé d'un projet permettant d'appuyer l'évolution des pratiques agricoles dans ces périmètres dont certaines en lien avec l'adaptation ou l'atténuation du changement climatique ; il se développe également des actions de plantation de haies financées par des dispositif carbone.

Il existe enfin des actions de structuration de filières, telles les filières à bas niveau d'intrants (FIBANI), financés par les Agences de l'eau (2021). Enfin, on trouve également les nombreuses actions de PAT sur la consommation, à l'aval. Ces outils vont avoir de l'impact sur l'alimentation produite sur le territoire, ses modes de production, mais aussi sur l'alimentation importée, donc l'empreinte carbone importée. Ce sont des actions de sensibilisation, d'accompagnement des changements de comportement alimentaire comme les outils d'éducation à l'alimentation.

3. Les conditions requises et les actions prioritaires pour la réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux

Lors d'un échange participatif d'idées concernant les conditions requises et actions prioritaires pour la réduction de l'empreinte carbone**,** plusieurs propositions à court et moyen terme (2030 et 2050) ont été dégagées. Mais, selon le souhait des participants, la distinction entre les propositions à échéance 2030 et échéance 2050 ont été regroupées, car l'urgence de la décarbonation fait que les actions doivent être engagées sur le même pas de temps. Une synthèse des propositions est schématisée dans la figure 1.

Les suggestions issues de l'atelier sont de natures différentes et nous les avons regroupées selon qu'elles sont d'ordre politico-économique, social ou technique.

Sur le plan des politiques économiques, les participants ont considéré qu'une première condition pour réduire l'empreinte carbone du système agri-alimentaire était de sortir l'alimentation de l'emprise du marché mondial au profit d'une meilleure valorisation de la production nationale, ce qui supposerait d'instaurer un nouveau système de subventions en faveur du fonctionnement local des marchés et un nouveau système de taxes pour les produits hors union européenne. D'autres incitations économiques concrètes permettraient par ailleurs de favoriser la production locale au détriment des produits importés à plus forte empreinte carbone :

- la labellisation des entreprises qui afficheraient leur bilan carbone (avec une méthode standardisée) et un soutien financier spécifique dans leur trajectoire de réduction de l'empreinte carbone ;
- l'évolution de la normalisation des produits alimentaires, en particulier sur les critères de qualité favorables à la réduction de l'empreinte carbone (par exemple l'aspect visuel des fruits et légumes) ;
- le renforcement du levier de la commande publique (comme prévu mais encore peu réalisé pour les produits locaux dans la loi Egalim++) par un critère sur l'empreinte carbone ;
- l'aide à l'investissement des entreprises privées dans les projets alimentaires territoriaux ;
- l'appui des collectivités locales au développement des nouvelles relations entre producteurs et consommateurs : aide à la déspécialisation du territoire et à la relocalisation de productions alimentaires répondant aux besoins de la population, actions favorables au commerce de proximité au détriment de la grande distribution, sensibilisation des citoyens-consommateurs aux enjeux et intérêts d'achat des productions locales.

Sur le plan social, les participants ont distingué, d'une part, le besoin d'évolution des relations entre acteurs locaux par des actions plutôt politiques, d'autre part le besoin d'accompagnement des consommateurs, ces deux enjeux pouvant être favorables à la réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes agri-alimentaires territoriaux. Certaines propositions relèvent d'une politique qui ne serait plus seulement agricole mais agro-alimentaire, et plus seulement à l'échelle européenne mais à l'échelle régionale et locale : politiques et projets alimentaires régionaux et locaux définis conjointement par les représentants agricoles, les collectivités territoriales et les associations de citoyens-consommateurs, développement de filières locales, en particulier pour une évolution de la consommation alimentaire plus végétale, développement d'entreprises coopératives favorisant l'engagement des citoyens (comme les SCIC, Sociétés coopératives d'intérêt collectif), organisation de la réduction du gaspillage alimentaire dans une double démarche de sobriété dans les achats et d'économie circulaire pour la gestion des déchets. Les autres propositions de nature sociale portent sur le soutien aux acteurs :

- pour l'augmentation et l'accessibilité de la production alimentaire locale : le soutien au revenu des agriculteurs engagés dans une production alimentaire bas carbone, et des outils d'aide à l'accès aux produits locaux par les citoyens à faible revenu (développement des jardins familiaux et de l'autoproduction, sécurité sociale de l'alimentation) ;
- pour le changement de comportement des consommateurs : la mise en place d'outils et de méthodes d'informations et de sensibilisation auprès de tous les citoyens, dont les acteurs économiques locaux, sur les enjeux et les intérêts de réduire l'empreinte carbone de l'alimentation, formation des jeunes sur les moyens de réduction de son empreinte carbone par l'alimentation, démarches collectives pour la prise de conscience des biais cognitifs dans les habitudes de consommation et le conditionnement dans les achats.

Enfin, sur un plan plus technique, les participants ont axé leurs propositions d'actions sur la réduction de l'empreinte carbone dans trois directions :

- la forte atténuation locale de la production de gaz à effet de serre (GES), à la fois par développement des énergies renouvelables décarbonées et des pratiques agricoles innovantes en faveur du stockage du carbone dans les sols (par exemple accroissement du taux de matière organique des sols) ou de la réduction des GES (par exemple réduction des engrais minéraux azotés) ;
- le développement d'une bioéconomie locale permettant de réduire l'import d'intrants agricoles et le gaspillage de ressources organiques ;

- l'accroissement des outils et matériels partagés à l'échelle locale, que ce soit pour les matériels agricoles (CUMA), les ateliers de transformation agroalimentaire ou les magasins de producteurs locaux.

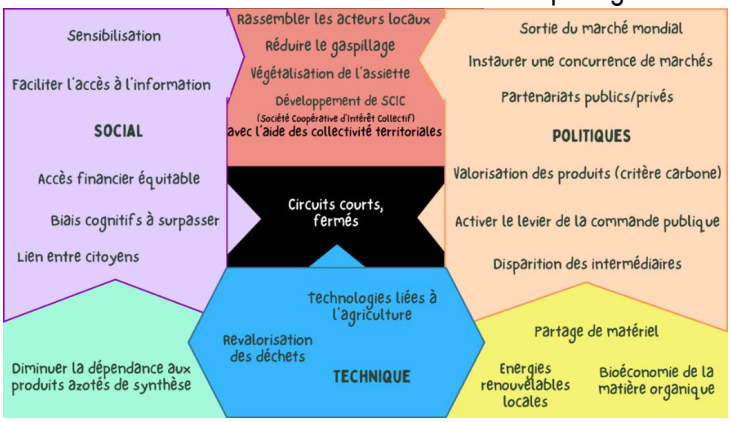


Figure 1 : Synthèse des propositions d'actions pour la réduction de l'empreinte carbone des systèmes alimentaires territoriaux

4. Quel système d'innovations en faveur d'une trajectoire de réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux ?

A partir des actions concrètes identifiées pour permettre une trajectoire de réduction de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux, les participants ont prolongé la réflexion sur la façon de rendre opératoires ces actions sous forme d'un système d'innovations permettant de relier les dimensions politique, économique et sociale qui se situeraient à l'échelle d'un territoire local, voire régional.

Cela se traduirait :

- sur le plan politique, par une forte implication de la collectivité publique locale (communauté de communes ou d'agglomération, territoire de projet comme un parc naturel régional, région administrative) pour faire travailler ensemble les différentes filières économiques dans une dynamique de réduction de l'empreinte carbone avec des innovations de type labellisation de produits bas carbone ou mesures incitatives au développement de nouvelles pratiques agricoles et/ou alimentaires ;
- sur le plan économique, par une mobilisation des entreprises locales pour faire évoluer le système de production vers des produits plus diversifiés, dans une démarche d'ancrage multi-local, correspondant mieux aux besoins de la population, et pour faire évoluer les pratiques agricoles et de transformation agro-alimentaire dans un objectif bas carbone et zéro déchet ;
- sur le plan social, par la reconnexion des citoyens avec l'agriculture, pour mieux comprendre les possibilités et les contraintes des agriculteurs (saisonnalité des productions, coût de revient...), avec des innovations de type living lab, rencontres de l'agriculture nourricière,... et par la reconnexion des consommateurs avec l'alimentation, que ce soit sur les aspects de nutrition, de relation alimentation-santé, de culture alimentaire ou de gestion des achats et du gaspillage alimentaire, là encore par des innovations dans la conception et la circulation des informations, ainsi que dans l'appropriation des connaissances.

5. Conclusion

Ce temps de travail participatif, qui a permis de discuter de la façon dont la dynamique actuelle des projets alimentaires territoriaux (PAT) pourrait intégrer l'enjeu de réduction de l'empreinte carbone, ne peut avoir qu'une ambition limitée, car les PAT ne constituent encore qu'une très faible part de la production agricole nationale et de la consommation locale. Et par ailleurs, cet échange autour de la réduction de l'empreinte carbone ne peut être isolé de la réflexion plus globale de la prise en compte de l'ensemble des limites planétaires et ainsi de demander plus de liens avec les problématiques de biodiversité, de gestion de la ressource en eau, ou de santé des sols…

Pour autant, les principales idées-force (encadré ci-après) qui sont ressorties de l'atelier centré sur la réduction de l'empreinte carbone constituent des arguments qui s'inscrivent bien dans une transformation des systèmes agri-alimentaires vers une durabilité forte pour une adaptation indispensable au changement climatique (Réseau action climat, 2024).

Les idées forces ressorties de l'atelier

Le système actuel dans sa globalité ne semble pas adapté aux défis futurs. L'avenir de l'agriculture repose sur des leviers comprenant des actions concrètes et collectives.

Le partage des connaissances et la mutualisation des ressources sont des leviers forts. Afin de rapprocher la société du monde agricole, la sensibilisation des citoyens aux réalités agricoles (productions de saison, pratiques culturales durables) est essentielle.

De plus, augmenter l'efficacité des pratiques agricoles tout en intégrant un respect de l'environnement, fait appel à des leviers techniques et socioculturels tels que la valorisation des déchets, la réduction du gaspillage et l'harmonisation des pratiques à l'échelle nationale.

Enfin, pour soutenir la société dans cette transition, des mesures politiques s'avèrent essentielles. La mise en place d'aides ciblées répondant aux besoins, l'application du principe du pollueur-payeur via des crédits carbone, ainsi qu'une amélioration de la labellisation des produits, ont un rôle à jouer.

Car la réduction de l'empreinte carbone des systèmes agri-alimentaires ne peut s'envisager sans la relocalisation des filières agricoles *et al*imentaires, selon des formes variées dépendantes des spécificités des contextes territoriaux. En travaillant ensemble, agriculteurs, citoyens et décideurs peuvent poser les bases d'une agriculture plus responsable et équilibrée. En particulier, la prise de risque dans l'adaptation au changement climatique devra être partagée, pour ne pas reposer seulement sur les agriculteurs. Les filières, les collectivités territoriales et les organisations de citoyens peuvent jouer un rôle important dans le partage et l'accompagnement de cette prise de risque (Réseau Action Climat, 2024).

Cela supposera ainsi de nouvelles formes de soutien aux productions nationales, des taxes sur les produits importés et le développement de circuits courts. Des initiatives comme les Sociétés Coopératives d'Intérêt Collectif (SCIC) et les partenariats publics-privés sont aussi à encourager pour le développement de projets territoriaux comme l'instauration d'une bioéconomie locale ou de système de revalorisation des déchets.

De même, les collectivités et la commande publique devront prioriser les achats locaux et instaurer des labels ou des outils standardisés de calcul du bilan carbone afin de valoriser des produits à faible impact environnemental.

Enfin, il reste important de rappeler que la sensibilisation des citoyens aux enjeux climatiques et aux pratiques alimentaires durables est cruciale pour dépasser les habitudes de consommation en vue de réduire le gaspillage et d'assurer la souveraineté alimentaire.

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.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des participants à l'atelier « **La gestion de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux** » du Carrefour de l'innovation agronomique de septembre 2024 à Bordeaux Sciences Agro.

Contributions des auteurs

Le contenu de l'atelier et son animation ont été définis par Philippe Prévost et Paul Mazerand.

Paul Mazerand, spécialiste des systèmes alimentaires territoriaux a témoigné de l'expérience d'accompagnement de l'association Terres en ville. Et la synthèse des travaux de l'atelier a été assurée par Gabrielle Basset et Yannick Schafer.

La rédaction de l'article a été animée par Philippe Prévost, avec les apports de Patrick Mazerand (partie 2) et de Gabrielle Basset et Yannick Schafer (parties 3 et 4).

Déclaration d'intérêt

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

Déclaration de soutien financier

Sans objet.

Références bibliographiques

ADEME, 2011. Démarche d'analyse territoriale de l'énergie et des gaz à effet de serre pour l'agriculture et la forêt. Présentation et guide de mise en œuvre de Climagri. Librairie ADEME, accessible en ligne

ADEME, 2024. Le plan climat air énergie territorial, https://www.territoires-climat.ademe.fr/, consulté le 25 août 2024.

Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2021. Retour d'expérience - Développement de FIBANI - Projet alimentaire territorial de Montpellier Méditerranée métropole. https://www.eaurmc.fr/jcms/pro_104434/fr/rex-developpement-de-fibani-projet-alimentaire-territorial-de-montpellier-mediterranee-metropole-34

CEREMA, 2021. Le périmètre de protection des espaces agricoles et naturels périurbains (PENAP, ENAP ou PAEN). https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/perimetre-protection-des-espaces-agricoles-et-naturels-periurbains-penap-enap-paen

France PAT, 2024. Le portail du réseau national des projets alimentaires territoriaux, https://france-pat.fr/presentation/, consulté le 25 août 2024.

Réseau Action Climat, 2024. La France face au changement climatique : toutes les régions impactées, https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2024/09/rac_climat-region-rapport_12-web.pdf, consulté le 25 septembre 2024.

Pour citer cet article : Gabrielle Basset, Yannick Schafer, Martine Babo, Laird Inès, Paul Mazerand, *et al.*. La gestion de l'empreinte carbone dans les systèmes alimentaires territoriaux : où en est-on ? Quelles innovations en faveur d'une trajectoire de réduction de l'émission de gaz à effet de serre ?. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.46-53. 10.17180/ciag-2025-vol102-art05

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.

Les trajectoires de transformation des systèmes agri-alimentaires pour une neutralité carbone

Claire ROGEL-GAILLARD[1], Jérôme MOUSSET[2], Jean-Louis DUBOURG[3], Philippe SOMMER[4], Carine BARBIER[5]

[1] Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, GABI, 78350 Jouy-en-Josas, France

[2] ADEME

[3] Chambre d'Agriculture de la Gironde, 17 cours Xavier Arnozan, CS 71305, 33082 BORDEAUX CEDEX

[4] La Coopération Agricole Nouvelle Aquitaine, 5 avenue Paul Langevin - 33600 Pessac

[5] Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, CNRS, 45 bis Av. de la Belle Gabrielle, 94130 Nogent-sur-Marne

Correspondance : claire.rogel-gaillard@inrae.fr

DOI : https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol102-art06

Résumé

La stratégie nationale pour atteindre la neutralité carbone en 2050 s'adresse à tous les secteurs d'activités, dont celui de l'agriculture et des systèmes agri-alimentaires. Cet article est le fruit d'une table ronde avec quatre intervenants (ADEME, Chambre d'Agriculture, Coopération agricole, recherche en économie) qui ont chacun apporté leur vision de l'ampleur des transitions à opérer, des difficultés identifiées et des moyens à mobiliser. Le débat a mis en avant la nécessité de s'appuyer sur des innovations technologiques mais également organisationnelles et sociétales, avec le besoin d'une mise en cohérence de politiques publiques incitatives qui permettent des changements de pratiques compatibles avec la vitalité économique du secteur agricole. Cette trajectoire de décarbonation requiert l'implication de tous les acteurs, y compris des citoyens-consommateurs amenés à faire évoluer leurs régimes alimentaires pour des raisons environnementales et sanitaires. La question est d'ordre systémique avec des déclinaisons territoriales et, au-delà de la sécurité énergétique *et al*imentaire, elle doit aussi considérer le concept « une seule santé » comme un levier clé pour une approche intégrée du système alimentaire et de sa durabilité, en capacité d'anticiper des crises. Les inflexions de décarbonation dans le secteur agricole sont encore limitées mais existent. Communiquer positivement sur cette trajectoire de changement comme source d'opportunités est identifié comme un message d'importance sur lequel davantage s'appuyer.

Mots-clés : décarbonation, trajectoire, transition, système agri-alimentaire, innovations sociotechniques, politiques publiques

Abstract: Transformation paths for agri-food systems to achieve carbon neutrality

The national strategy to achieve carbon neutrality by 2050 is aimed at all sectors of activity, including agriculture and agri-food systems. This article is the result of a round table discussion with four panellists (ADEME, Chambre d'Agriculture, Coopération agricole, economic research), who gave their vision of the scale of the transitions to be made, the difficulties and the resources that should be mobilised. The debate highlighted the need to rely on technological innovations, as well as organisational and societal innovations. Coherent public policies encouraging changes in practices that are compatible with the economic vitality of the agricultural sector are expected. This decarbonisation trajectory requires the involvement of all players, including citizen-consumers, who are being encouraged to change their food diet for environmental and health reasons. This is a systemic issue,

with regional implications. In addition to energy and food security, it must also consider the 'one health' concept as a key lever for an integrated approach to the food system and its sustainability, also enabling an improved capacity to anticipate crises. Decarbonisation trends in the agricultural sector are still limited, but they do exist. Communicating positively about this trajectory of change as a source of opportunities is a key message to better rely on.

Keywords: decarbonation, trajectory, transition, agri-food systems, socio-technical innovations, public policies

1. Introduction

Les systèmes agro-alimentaires, comme tous les secteurs d'activité, doivent contribuer à la décarbonation pour accompagner la stratégie nationale bas carbone qui prévoit une réduction par six des émissions de carbone à l'horizon 2050 afin d'atteindre la neutralité carbone en France. Cette ambition nécessite des transitions qui interrogent sur les modèles de transformation en capacité de répondre à ces objectifs, et sur les accompagnements nécessaires.

A l'occasion du Carrefour de l'Innovation Agronomique sur le thème « Empreinte carbone : trajectoires pour les activités agricoles et agroalimentaires », une table ronde a été organisée avec quatre intervenants qui se sont exprimés sur leurs visions de ces modèles de transformations : Jérôme Mousset, directeur de la bioéconomie et des énergies renouvelables à l'ADEME ; Jean-Louis Dubourg, Président de la Chambre Agriculture de la Gironde ; Philippe Sommer, délégué régional de la Coopération agricole Nouvelle Aquitaine et Carine Barbier, chercheuse en économie au CNRS.

Les discussions ont porté sur les leviers nécessaires pour conduire des changements, avec un rappel des enjeux majeurs et des perspectives en termes d'emplois et de travail. Il a été souligné l'importance de comprendre l'impact de ces leviers sur l'ensemble de la chaîne de valeur et d'identifier les connaissances manquantes pour évaluer efficacement ces contributions. Il est également question des défis persistants et des obstacles qui doivent être identifiés et traités afin d'assurer une évolution positive vers la décarbonation de l'agriculture et plus largement des systèmes agri-alimentaires. Ces témoignages illustrent que nous sommes à un tournant décisif mais riche d'opportunités qu'il est important de rappeler.

2. Ampleur des transitions : regards croisés sur la vision et la perception des enjeux et objectifs à atteindre

Jérôme Mousset rappelle l'importance de la transition écologique en France, l'ADEME étant une agence qui appuie l'Etat pour la mise en œuvre des politiques publiques sur cette transition. Il rappelle la faisabilité démontrée dans plusieurs études pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 mais insiste sur la nécessité d'accélérer les efforts actuels car 2050 c'est dans seulement 25 ans. Il évoque le rôle central de l'agriculture et des systèmes alimentaires pour atteindre cet objectif, appelant à la co-construction d'un cap commun dans ces deux secteurs qui relient la production à la consommation, avec un accompagnement à organiser. Trois leviers essentiels pour la transition sont mis en avant : 1) la transformation du système alimentaire incluant l'évolution des régimes avec un nouvel équilibre entre la consommation de produits d'origine animale et végétale, la saisonnalité des consommations et la relocalisation des approvisionnements ; 2) la transition énergétique de la société avec la contribution essentielle de l'agriculture (réduction de la dépendance de l'agriculture aux énergies fossiles, production d'énergies renouvelables avec la biomasse, biogaz, agrivoltaïsme) ; 3) l'adoption de pratiques agroécologiques favorisant notamment la préservation des milieux et le stockage du carbone. Il met en avant des points de consensus sur ces trois leviers, affirmant qu'il est crucial de se concentrer sur les accords plutôt que sur les désaccords pour progresser efficacement vers les objectifs de

durabilité. Des leviers efficaces sont identifiés et chiffrés : le rôle de l'agriculture pour la production d'énergie renouvelable, la place des prairies pour le stockage du carbone, la gestion de l'azote, les arbres et les haies dans les écosystèmes, etc. L'objectif est désormais de prendre les bonnes décisions et de se fixer une trajectoire consensuelle et commune, prenant un peu de hauteur pour regarder de manière collective dans la même direction. Ce qui est en débat, ce n'est pas tant les alternatives permettant la décarbonation, mais plutôt l'ambition donnée à chaque action et le rythme d'évolution.

Jean-Louis Dubourg, avec son regard d'agriculteur et de Président de Chambre d'Agriculture, souligne l'importance d'accompagner les agriculteurs face aux défis liés au changement climatique, avec des conséquences par exemple sur la croissance des plantes, la santé animale et l'apparition de nouveaux ravageurs. Il rappelle aussi que la profession agricole est en constante évolution, et l'a toujours été : les agriculteurs savent qu'ils doivent s'adapter pour survivre. Enfin, il évoque le remplacement nécessaire des matériels agricoles vieillissants qui consomment beaucoup de carburant, précisant que ceux-ci trouvent souvent une nouvelle vie dans d'autres régions comme en Europe de l'Est, ce qui ne fait que déplacer le problème des équipements à forte empreinte carbone.

Philippe Sommer précise que les coopératives agricoles sont des entreprises détenues par des agriculteurs. Leur rôle est de valoriser la production agricole et de répondre aux besoins du marché. Les coopératives contribuent à la lutte contre le changement climatique, ayant déjà engagé des efforts significatifs pour réduire les émissions de carbone. Les coopératives y consacrent du temps, de l'argent, de l'énergie. En France, elles représentent environ deux tiers de la collecte en grande culture, 30 % pour la viande et 50 % pour lait. Une étude récente montre que leur activité (collecte/ transformation) représente environ de 70 millions de tonnes de carbone par an sur le scope 1-2-3. L'objectif est de réduire ces émissions de 50 % d'ici 2050, avec une étape intermédiaire de réduction de 25 % d'ici 2030. Il faut faire en 5 ans plus que ce qui a été fait ces 30 dernières années : la prise de conscience est très forte. Bien qu'il existe un consensus sur les pratiques agricoles à adopter pour améliorer la durabilité, avec des effets sur l'eau, la biodiversité, l'empreinte carbone, le défi reste leur mise en œuvre et leur massification, ce qui nécessite de trouver un modèle économique sur l'ensemble de la chaine de valeur.

Carine Barbier, avec sa vision de chercheuse en économie, souligne l'importance de la résilience face aux défis du changement climatique dans le secteur agricole : les dommages causés par ce changement ne sont pas linéaires et nécessitent une réponse adaptée à des épisodes de crise de plus en plus fréquents et importants, tels que des fluctuations des prix des intrants et des ruptures d'approvisionnement, comme cela a été le cas au moment de la pandémie de COVID19 ou lors de l'interruption des routes maritimes en Mer Rouge en 2024 pour cause de conflits, ou encore du canal du Panama en 2023 à cause de la sécheresse. Il est nécessaire d'intégrer ces risques pour garantir la sécurité alimentaire et énergétique, en promouvant une agriculture agile et adaptable pour faire face aux aléas de production, tels que les problèmes de ressources en eau ou les événements climatiques extrêmes. Carine Barbier affirme la nécessité d'aller au-delà de la sécurité énergétique *et al*imentaire, qui est le fondement de l'Union européenne, mettant en avant le concept « une seule santé » qui, englobant la santé humaine, animale et des écosystèmes environnementaux, est présenté comme un levier clé pour une approche systémique du système alimentaire et de sa durabilité. Pour compléter, les transitions doivent aussi prendre en compte le besoin de stabiliser les emplois et d'établir un nouveau contrat social entre les acteurs du système alimentaire pour aborder ces défis, avec une attention particulière sur la nécessité de convergence dans les efforts menés.

3. Construire une trajectoire cohérente fondée sur des innovations sociétales et technologiques, qui accompagne tous les acteurs dans une temporalité qui ne confond pas urgence et précipitation

Pour illustrer le sujet, Philippe Sommer évoque les incohérences des démarches actuelles sur la décarbonation dans le secteur agricole. En effet, avec un label bas carbone, il est difficile de concilier les objectifs de réduction de l'empreinte carbone de l'alimentation et la valorisation des crédits carbone sur d'autres filières. Il devient donc essentiel de clarifier la comptabilité carbone et de soutenir les agriculteurs dans leurs efforts de réduction des émissions et de stockage, qui entrainent des coûts élevés. Les coopératives pourraient jouer un rôle crucial en créant des filières rémunératrices. Dans ce domaine, des défis persistent concernant aussi la volonté des consommateurs de contribuer au financement de ces initiatives. Jean Louis Dubourg, producteur de pommes de terre pour chips et frites, s'accorde aussi sur les défis du secteur agricole face aux attentes des consommateurs français et souligne que, malgré la pression exercée sur les agriculteurs pour produire des aliments de qualité supérieure et bio, la réalité économique reste complexe. On peut considérer qu'il y a 130 millions de Français avec des exigences variées : 65 millions demandent des produits bio mais ces mêmes 65 millions pourtant dotés d'un pouvoir d'achat élevé privilégient le choix au supermarché. Cela remet en lumière le rôle crucial du consommateur dans ses priorités d'achat, soulignant que même ceux avec des moyens financiers conséquents ajustent leurs choix en fonction de leur santé et de leurs besoins.

Les orateurs s'accordent sur le fait qu'il est indispensable de trouver une trajectoire qui ne laisse personne en arrière, garantissant aux agriculteurs et éleveurs leur maintien en activité et leurs revenus. A cette trajectoire est associée la question sensible de l'évolution des régimes alimentaires, avec un nouvel équilibre à promouvoir dans la consommation entre produits d'origine animale et végétale : incitations à réduire la part de viande dans les régimes au profit d'aliments végétaux. Les différents acteurs du système alimentaire, notamment les transformateurs et distributeurs, ont une responsabilité dans l'offre alimentaire et doivent soutenir cette double évolution (transition agricole *et al*imentaire).

Carine Barbier souligne l'importance de la modélisation en économie pour alimenter le débat et identifier des leviers dans le secteur agricole afin de construire une trajectoire de changements. Malgré des innovations technologiques, les émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture n'ont que peu diminué au cours des dix dernières années, soulevant des questions sur les obstacles à l'implémentation de solutions existantes. De fait, les domaines comme les sciences politiques, l'économie et la sociologie doivent être mobilisés pour mieux comprendre et surmonter ces freins. Comme rappelé par Jérôme Mousset, les scénarios présentés récemment par l'ADEME mettent en avant un modèle sociétal intégrant l'agriculture. L'objectif est de passer à l'action afin d'accélérer la transition, en soulignant la nécessité d'accompagnement et d'innovation. Et il est crucial de reconnaître que les solutions ne sont pas uniquement technologiques ; elles relèvent aussi voire surtout des domaines social, économique et systémique, avec un besoin accru de connaissances sur tous ces volets.

Jérôme Mousset met en avant trois points qui font écho aux éléments précédents. Premièrement, il est important de construire des modèles durables et attrayants dans le cadre de la transition écologique, en mettant l'accent sur la nécessité d'impliquer tous les acteurs, y compris les citoyens, les agriculteurs et les entreprises. Il convient de se mettre en garde contre la tendance à se concentrer sur les difficultés au lieu de mettre en avant les opportunités offertes par cette transition, notamment à travers des résultats concrets qui affectent le quotidien des citoyens. Il faut privilégier l'adhésion des citoyens, des agriculteurs et des filières plutôt que de chercher à les convaincre, ou d'accepter des projets imposés. Cette adhésion suppose une implication des acteurs dans la construction des trajectoires. Deuxièmement, il convient de considérer un changement d'échelle, en passant de l'exploitation agricole individuelle à une approche territoriale ou de filière. En effet, les défis environnementaux, comme l'adaptation au changement climatique, nécessitent des solutions systémiques souvent complexes et

difficiles à résoudre à une échelle trop petite et isolée. Par exemple, la méthanisation peut nécessiter dans certains territoires des partenariats entre agriculteurs et entreprises agroalimentaires. Ce changement d'échelle est crucial pour que les évolutions dans le secteur agricole soient mutuellement soutenues par les coopératives et l'industrie agroalimentaire. Cela nécessite des innovations et des outils de planification pour guider la transition à un niveau territorial adéquat. Troisièmement, la mise en œuvre de la transition politique, alimentaire et agricole doit s'appuyer sur une approche intégrée permettant de prendre en compte en même temps les différents enjeux environnementaux, économiques et sociologiques. Comme exemple concret de liens entre ces volets de la transition : l'affichage environnemental visant à donner une information environnementale globale et simple et à amener des transformations à la fois sur les modes de consommation et les modes de production. Des innovations sont attendues aussi dans les modes de financement, car la transition ne peut pas reposer uniquement sur l'argent public.

4. Besoin de politiques publiques adaptées et de formation

Le débat a mis en avant des thèmes liés au besoin d'alignement des politiques publiques et de formation, avec en thème connexe non repris ici la nécessité d'aborder de manière collaborative et collective les controverses sur les régimes alimentaires dont l'évolution conditionne la réussite de la transition agricole.

Concernant les politiques publiques, Philippe Sommer insiste sur la nécessité de les clarifier, notamment celles qui visent la comptabilisation du carbone. Il souligne l'importance de comprendre comment les économies de carbone sont réparties tout au long de la chaîne d'approvisionnement agricole et les coûts engendrés distribués entre les acteurs (agriculteurs, coopératives, industriels agroalimentaires, distributeurs, consommateurs), Il s'interroge également sur la manière dont les bénéfices de la réduction des émissions de carbone seront répartis entre les produits d'une même exploitation, tels que le blé ou les fruits à coque, et souligne enfin la pression exercée par les réglementations nationales et européennes, qui peuvent souvent être contradictoires. Ce besoin de coordination entre les différents secteurs du climat, de la santé, de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement est repris par Jérôme Mousset. Une stratégie nationale sur l'alimentation, la nutrition et le climat devrait être publiée prochainement. Sont attendues des politiques intégrées et cohérentes afin d'éviter les actions contradictoires et les approches cloisonnées, qui peuvent exacerber et rendre les orientations difficilement compréhensibles. Ces politiques doivent permettre d'anticiper les dommages liés au climat pour préparer les systèmes de production et minimiser les coûts et les effets négatifs. Carine Barbier ajoute que les politiques publiques doivent permettre de l'anticipation face aux crises, au cours desquelles de fréquentes décisions sont souvent précipitées et inadaptées, comme observé dans le cas de l'Ukraine. Les pouvoirs publics, tant au niveau national qu'européen, ont la responsabilité d'anticiper pour orienter efficacement le système alimentaire vers des objectifs clairs, notamment une réduction de 50 % des émissions de gaz à effet de serre.

Concernant la formation, Jean-Louis Dubourg rappelle que le secteur agricole connaît une évolution rapide, avec un changement imminent dans la pyramide des âges des agriculteurs. De nombreux agriculteurs vieillissants vont bientôt prendre leur retraite et être remplacés. Les nouveaux arrivants pourraient être soit bien formés et capables de s'adapter, soit mal préparés et voués à l'échec. La profession agricole présente une forme d'apparente simplicité, et sa complexité réside dans l'assemblage des différentes techniques, notamment en matière de production et de gestion. Il est crucial pour les agriculteurs d'avoir une bonne maîtrise des coûts de production, comme le démontre par exemple le cas d'un agriculteur qui ne connaît pas le coût de production de son produit. Les agriculteurs adoptent de plus en plus des pratiques agricoles décarbonées en ayant conscience de l'importance de la transition vers l'utilisation efficace des ressources. Les agriculteurs progressent dans l'utilisation des engrais et la gestion de l'irrigation. Des efforts sont réalisés pour réduire les doses

d'azote et coordonner l'usage de l'eau via des technologies avancées. Cependant, seulement un tiers des agriculteurs recherchent des conseils pour améliorer leurs pratiques, alors qu'il y a besoin d'éducation et d'accompagnement. Des formations en phase avec les changements et une réflexion technique chez les agriculteurs sont à développer, avec la suggestion d'associer des ingénieurs dans les fermes pour optimiser les décisions liées à la fertilisation et à l'irrigation.

5. Des messages d'optimisme pour réussir les transitions, les transformations et les changements à opérer

Philippe Sommer insiste sur la cohérence essentielle des politiques à conduire, en particulier dans le contexte de la transition carbone, qui a un impact également sur la biodiversité et les questions liées à l'eau. Il préconise de mener simultanément les politiques environnementales et les stratégies industrielles et économiques, afin d'éviter les pertes de compétitivité. La relance de l'agriculture en France devra coupler les politiques de transition et les politiques alimentaires et territoriales locales avec les citoyens.

Jean-Louis Dubourg exprime un message d'optimisme concernant l'agriculture, soulignant les nombreuses opportunités disponibles dans le secteur. Il affirme que la réussite est possible dans beaucoup de productions, tailles d'exploitation et modes de commercialisation, ce qui ouvre la voie à l'innovation, avec notamment le développement de la robotique et la recherche sur de nouvelles variétés, en capacité de rendre l'agriculture encore plus performante et passionnante.

Jérôme Mousset partage un message positif concernant la transition écologique car elle est déjà en cours, avec des résultats positifs observés. Des améliorations sont visibles avec de nombreux exemples concrets. Au-delà des difficultés inhérentes au changement climatique, la transition offre de belles perspectives professionnelles pour l'avenir, en faisant de la durabilité un fondement de l'agriculture, avec de nouvelles opportunités économiques pour le secteur agricole, une alimentation plus saine pour le grand public, et une meilleure relation entre agriculteurs et consommateurs. Il insiste sur l'importance de communiquer de manière positive sur ces transitions pour favoriser leur acceptation et participation.

Carine Barbier exprime son optimisme concernant l'avenir de l'agriculture, en s'appuyant sur l'implication croissante des nouvelles générations dans les questions alimentaires. Elle estime que les jeunes, bien informés des défis actuels, apportent une richesse de réflexion et une ambition nécessaire pour transformer le système alimentaire. Leur énergie et innovation permettront de trouver des solutions pour faire converger les préoccupations sociales et environnementales et de tracer une trajectoire d'avenir soutenable.

Le Haut Conseil pour le climat a publié un rapport sur une agriculture résiliente, bas carbone et juste, mettant l'accent sur la mutualisation des risques. Les discussions lors de cette table ronde ont souligné la nécessité de pragmatisme, d'innovation, d'audace et de volonté de la part de tous les acteurs impliqués.

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

La synthèse de cette table ronde a exploité une retranscription faite avec l'aide de Microsoft 365.

Identifiants des auteurs

Claire Rogel-Gaillard : https://orcid.org/0000-0002-2174-1962

Carine Barbier : IdHAL carine-barbier

Contributions des auteurs

Claire Rogel-Gaillard a préparé et animé la table ronde et a rédigé une première version de cet article. Jérôme Mousset, Jean-Louis Dubourg, Philippe Sommer et Carine Barbier ont été les panelistes de la table ronde. Leurs réponses ont alimenté le contenu de cet article, qu'ils ont précisé et enrichi.

Déclaration d'intérêt

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

Remerciements

Les auteurs remercient les organisateurs du carrefour de l'innovation INRAE pour la qualité de la programmation.

Déclaration de soutien financier

Sans objet.

Références bibliographiques

ADEME. 2024. Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat. https://librairie.ADEME.fr/societe-et-politiques-publiques/5072-prospective-transitions-2050-rapport-9791029718878.html

Haut Conseil pour le Climat. 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste. 2024. Rapport. https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2024/01/2024_HCC_Alimentation_Agriculture_25_01_webc_vdef-2.pdf

Barbier C., Couturier C., Dumas P., Kesse-Guyot E., Baudry J., Pharabod I., Pourouchottamin P., Toilier F. 2022. Prospective du Système Alimentaire et de son Empreinte énergétique et carbone, cinq visions de l'alimentation en France vers la neutralité carbone en 2050. 100 pages. CIRED. https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2022/09/Publication_SISAE.pdf

Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Caya J.-M., Silvestre M, Pharabod I. 2019. L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France. 24 pages. https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2021/05/empreinte_carbone_alimentation_en_france_fr_052019.pdf

Barbier C., Couturier C.., Dumas P., Kesse-Guyot E., Pharabod I., AdEME. 2020. Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation. Partie 2 : Empreintes des importations agricoles *et al*imentaires françaises. 35 pages. https://www.centre-cired.fr/wp-content/uploads/2021/09/Barbier_et_al_Empreintes-sol-energie-et-carbone-des-importations-alimentaires-franc %CC %A7aises.pdf

Pour citer cet article : Claire Rogel Gaillard, Jerome Mousset, Jean-Louis Dubourg, Philippe Sommer, Carine Barbier. Les trajectoires de transformation des systèmes agri-alimentaires pour une neutralité carbone. *Innovations agronomiques*, 2025, 102, pp.54-60. 10.17180/ciag-2025-vol102-art06

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.