



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



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 Toubanc (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



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 HENAUT, 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 HENRY²

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

² Chaire industrielle AgroMéthas, 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 (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O) et à la marge par le dioxyde de carbone (CO₂). 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 (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and, to a lesser extent, carbon dioxide (CO₂). 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 meet all the challenges identified: decarbonization, maintaining livestock farming, significant energy production, a massive export policy and food self-sufficiency while respecting a genuine agro-ecology.

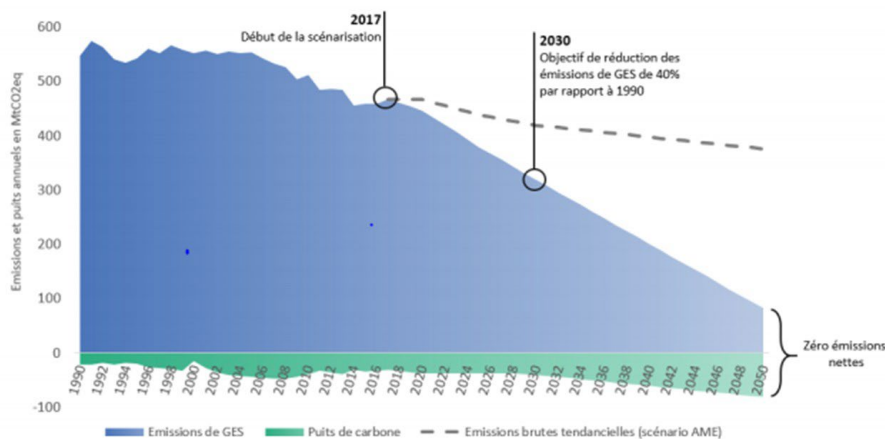
Keywords: Transition, decarbonation, agriculture, biomass, methane, scenario

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 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 « tendanciellées » 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).

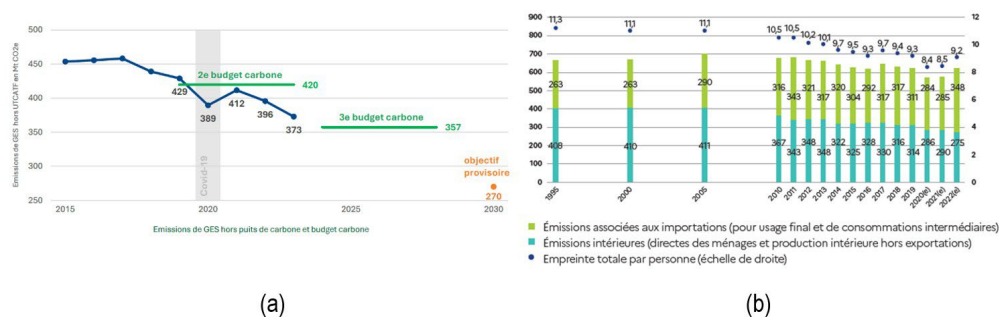


Figure 2 : (a) Emission de GES hors puits de carbone et budget carbone, Mt CO₂eq (CITEPA, 2024) (b) Empreinte carbone de la France de 1995 à 2022, Mt CO₂eq, (SNBC, 2024).

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 apparaît 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)).

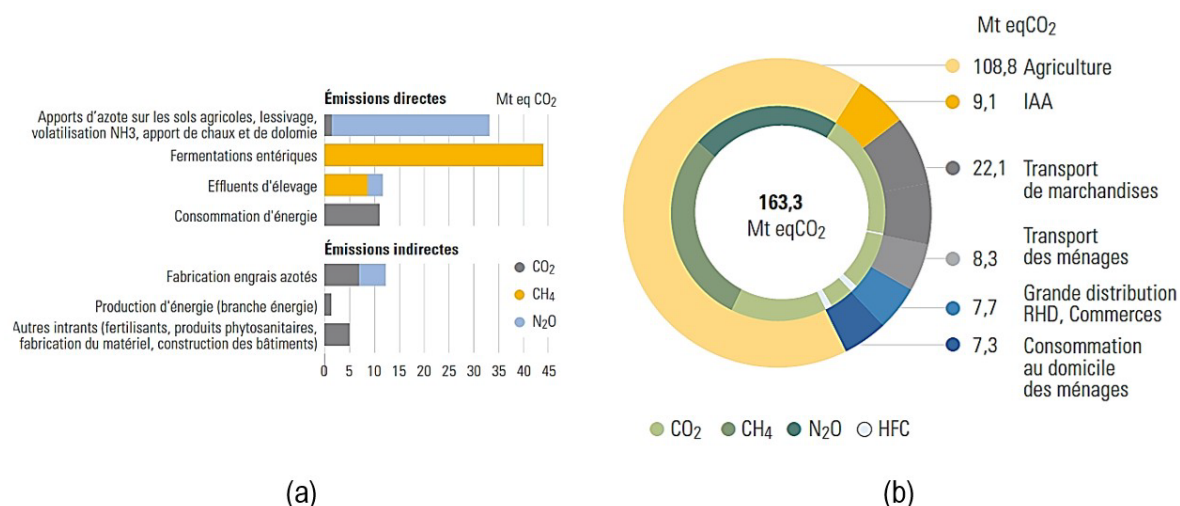


Figure 3 : (a) Empreinte GES du secteur agricole et agro-alimentaire, (en Mt CO_2eq ; (b) Emissions territoriales de GES de l'agriculture - (moyenne 2008-2013) en émissions directes et indirectes, (Barbier *et al.*, 2019).

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 CO₂ 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 CO₂. 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 annonce 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).

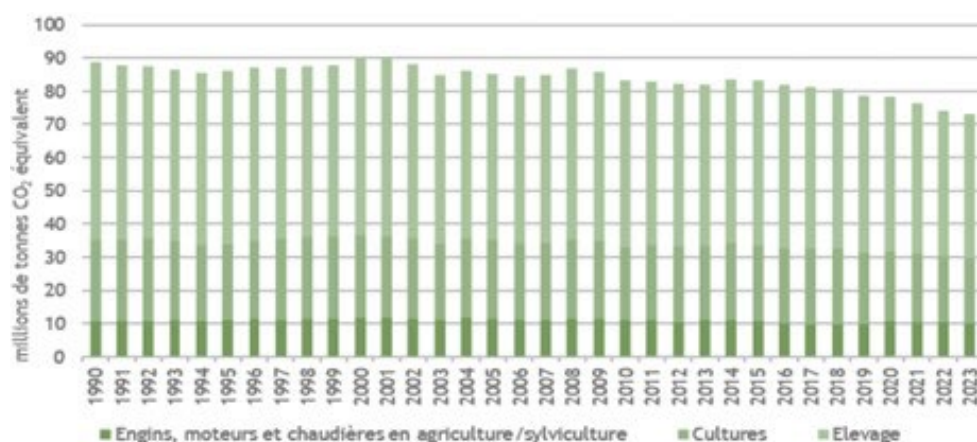


Figure 4 (a) : Répartition des émissions de CO₂eq du secteur de l'agriculture/sylviculture en France, Métropole et Outre-mer UE (CITEPA, 2024).

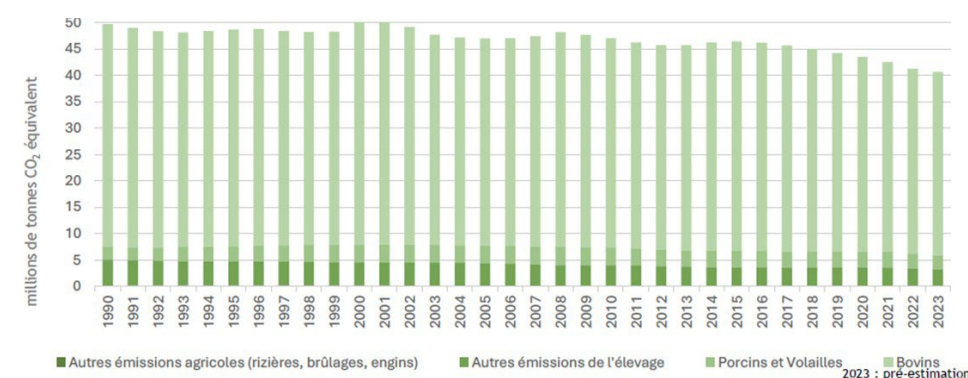


Figure 4 (b) : Répartition des émissions de CH₄ du secteur de l'agriculture / sylviculture en France, Métropole et Outre-mer UE (CITEPA, 2024).

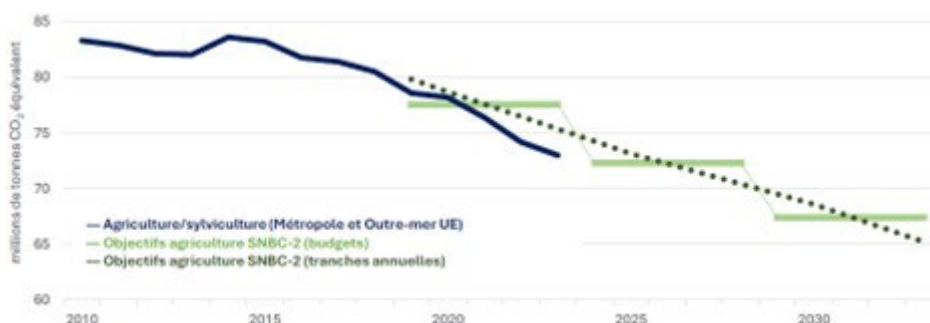


Figure 5 : Émissions de GES du secteur de l'agriculture/sylviculture et objectifs SNBC-2 (CITEPA, 2024).

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 CO₂ 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 CH₄ et le N₂O 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 CH₄ ainsi que (ii) la production végétale pour le N₂O.

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 CO₂eq 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 %
Planter des prairies temporaires ou permanentes	Ha PT ou PP			x	2 à 3 %
Gestion des infrastructures agro écologiques					
Planter des haies	M 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 CH₄ 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 CH₄,