

Vers une meilleure estimation de la contribution du méthane venant de l'élevage au réchauffement climatique

Calculs des besoins d'élimination du CO₂ pour neutraliser le réchauffement climatique associé aux émissions de méthane et du dioxyde d'azote issus de l'élevage : comparaison de deux métriques dans les scénarios FAO 2050.

Mots-clés : méthane, réchauffement climatique, élevage, gaz à effet de serre

Auteur : Fabio Correddu, Mondina Francesca Lunesu, Sara Sechi, Maria Francesca Caratzu, Guiseppe Pulina

Dipartimento di Agraria, University of Sassari, Italy

Cet article est une mise en perspective simplifiée de la publication scientifique suivante : Fabio Correddu, Mondina Francesca Lunesu, Sara Sechi, Caratzu MF, Pulina G (2025) CO₂ removal to reach net zero warming of global methane and nitrous oxide emissions of livestock: Comparison of two metrics under different 2050 FAO scenarios. PLoS One 20(8): e0330379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330379>

Résumé :

Atteindre les objectifs climatiques mondiaux exige une quantification précise des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de leur impact sur la température. Or, le choix de la métrique – en particulier entre le Potentiel de Réchauffement Global à 100 ans (PRG₁₀₀) ou « Global Warming Potential » en anglais (GWP₁₀₀) et le Potentiel de Réchauffement Global Étoile (PRG*) en anglais GWP* – influence fortement la manière dont les émissions et leurs contributions au réchauffement sont représentées dans les bilans climatiques. Bien que les métriques ne modifient pas les résultats physiques en termes de température, elles affectent l'interprétation de l'impact des émissions et, par conséquent, les estimations d'élimination du CO₂ et les stratégies d'atténuation.

En utilisant les projections de la FAO pour les émissions mondiales de l'élevage à l'horizon 2050, nous analysons comment le choix de la métrique affecte l'évaluation des estimations d'élimination du CO₂ nécessaires pour compenser les émissions de méthane (CH₄) et atteindre l'état « *pas de réchauffement supplémentaire* ». Nos résultats montrent que le PRG₁₀₀ peut surestimer ou sous-estimer l'impact cumulatif du CH₄ selon les trajectoires d'émission, tandis que le GWP* fournit une approche dynamique, mieux alignée sur les objectifs de température. Ces différences ont des implications politiques majeures, car elles influencent la perception de l'efficacité des stratégies d'atténuation et la répartition des besoins en termes d'élimination du CO₂. Cette étude souligne la nécessité de choisir des métriques appropriées dans la conception des cadres climatiques, en particulier pour des secteurs fortement émetteurs de méthane comme l'élevage, afin de représenter correctement leur contribution aux objectifs de température mondiale.

Abstract: Toward a more accurate estimate of the contribution of methane from livestock to global warming

Achieving global climate targets requires accurate quantification of greenhouse gas (GHG) emissions and their implied impact on temperature. However, the choice of emission metric—particularly between Global Warming Potential over 100 years (GWP₁₀₀) and Global Warming Potential Star (GWP*)—can significantly influence how emissions and their contributions to global warming are represented in climate assessments. While metrics do not alter physical temperature outcomes, they affect how emissions' impacts are interpreted, which in turn influences carbon dioxide removal estimates and mitigation strategies. Using FAO projections for global livestock emissions to 2050, we analyze how different metric choices affect estimates of the carbon dioxide removal required to offset methane (CH₄) emissions and achieve no additional warming condition. Our findings highlight that GWP₁₀₀ can overestimate or underestimate the cumulative warming impact of CH₄ emissions under different emission trajectories, whereas GWP* provides a dynamic approach that better aligns with temperature goals. These differences have critical implications for climate policy, as they influence the perceived effectiveness of mitigation strategies and the allocation of carbon dioxide removal requirements. This study underscores the necessity of selecting appropriate metrics when designing climate mitigation frameworks, particularly for methane-intensive sectors like livestock, to ensure an accurate representation of their contribution to global temperature targets.

I. INTRODUCTION

Pour atteindre l'objectif de limiter le réchauffement planétaire à +1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, les pays et les secteurs émetteurs de gaz à effet de serre (GES) doivent réduire fortement leurs émissions de GES et accroître leur absorption par les puits de carbone. Cependant, la réalisation d'un « équilibre entre les émissions anthropiques et les absorptions » peut donner lieu à des interprétations divergentes. En particulier, les implications pour chaque gaz dépendent de la métrique utilisée pour les comparer.

Les GES se divisent en deux grandes catégories :

- les polluants climatiques de longue durée, comme le dioxyde de carbone (CO₂) et le dioxyde d'azote (N₂O) dont la demi-vie est d'une centaine d'années (IPCC, 2021), et qui s'accumulent dans l'atmosphère pendant des siècles ;
- les polluants climatiques de courte durée, comme le méthane (CH₄), dont la durée de vie atmosphérique est limitée grâce à leur dégradation continue et une demi-vie d'une dizaine d'année (IPCC, 2021).

Ainsi, alors que les émissions cumulées de CO₂ sont presque linéairement liées à l'augmentation de température, ce n'est pas le cas pour le CH₄ en raison de sa dégradation continue. Par conséquent, certains auteurs ont suggéré que la méthode actuelle pour quantifier l'effet des gaz à effet de serre sur le réchauffement global (basée sur l'utilisation du PRG₁₀₀) tend à surestimer l'effet du méthane lorsque les émissions diminuent et à le sous-estimer lorsqu'elles augmentent. En effet, cette méthode ne distingue pas les effets des gaz à courte durée de vie (comme le CH₄) de ceux des gaz à longue durée de vie (comme le CO₂ persistant pendant des siècles) (Lynch *et al.*, 2020).

Une approche plus précise est le PRG*, qui représente mieux l'impact des polluants climatiques de courte durée comme le CH₄ sur la température (Lynch *et al.*, 2020). Ce nouvel indicateur a été reconnu par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) comme un outil plus adapté pour évaluer la contribution différenciée des GES au réchauffement global au fil du temps (IPCC, 2021). La FAO (2022) recommande également d'utiliser le GWP* pour estimer l'effet de réchauffement dans les scénarios historiques et prospectifs relatifs aux émissions de l'élevage.

L'interprétation de la neutralité climatique et ses implications pour les objectifs de température peuvent

donc dépendre potentiellement de la métrique retenue. Le PRG₁₀₀, en agrégeant les différents GES, peut conduire à des évaluations incohérentes avec l'objectif de 1,5 °C, en attribuant au méthane un poids disproportionné en cas de baisse des émissions ou au contraire sous-évalué en cas d'augmentation des émissions. Ces divergences influencent aussi l'estimation des émissions résiduelles à compenser, essentielle pour stabiliser le climat. Les compensations peuvent être obtenues par l'élimination du CO₂ atmosphérique grâce à diverses techniques : reforestation, restauration des sols, séquestration du carbone, capture directe de l'air, etc. (IPCC, 2021).

Comme l'ont montré des travaux récents, les besoins en élimination du CO₂ atmosphérique dépendent étroitement du choix de la métrique. Appliquer le PRG₁₀₀ aux secteurs à fortes émissions de méthane, comme l'élevage, peut fausser l'évaluation des efforts réels nécessaires. Le PRG* est considéré comme plus robuste pour calculer les compensations, même s'il tend à légèrement surestimer les besoins en élimination du CO₂ atmosphérique dans des scénarios d'émissions de méthane soutenues (Brazzola *et al.*, 2021).

L'élevage constitue l'un des secteurs les plus émetteurs de GES, principalement via le CH₄ issu de la fermentation entérique et de la gestion des effluents. La demande croissante en aliments d'origine animale devrait accroître ces émissions, posant un défi majeur aux objectifs climatiques. Toutefois, la plupart des évaluations reposent encore sur le PRG₁₀₀, qui ne reflète pas la spécificité du méthane.

La FAO (2023) a récemment proposé deux trajectoires à l'horizon 2050 :

- un scénario « business-as-usual » (BAU) sans atténuation, basé sur l'augmentation prévue de la demande en protéines animales,
- et un scénario de réduction des émissions grâce à diverses stratégies d'atténuation.

Le calcul de l'élimination du CO₂ atmosphérique requise pour atteindre un état de « pas de réchauffement supplémentaire » dépend directement de la métrique choisie. Ce travail applique donc à ces scénarios à la fois le PRG₁₀₀ et le PRG*, afin de comparer leurs implications sur les émissions équivalentes CO₂, les trajectoires de température et les besoins en élimination de carbone.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Données d'émissions et impact sur le réchauffement

Cette étude utilise les données historiques d'émissions de GES (CH₄ et N₂O) de la FAOSTAT (2024) [1961–2021] pour le secteur de l'élevage mondial, ainsi que les projections publiées par la FAO (2023) pour les émissions à l'horizon 2050.

Les émissions historiques ont été estimées selon la méthode du GIEC pour les inventaires nationaux de GES, couvrant la période 1961–2021 à l'échelle

mondiale (IPCC 1996, 2002, 2014 et Eggleton *et al.*, 2006). Les émissions annuelles de CH₄ incluent celles issues de la fermentation entérique et de la gestion des déjections de l'ensemble des animaux d'élevage. Pour le N₂O, ont été considérées les émissions provenant de la gestion des déjections, du fumier laissé sur les pâturages et du fumier épandu sur les sols.

II.2. Scénarios d'émissions projetées (FAO 2050)

La FAO a fourni des estimations d'émissions pour 2050, qui ont été utilisées pour construire trois trajectoires annuelles, en supposant un taux constant d'évolution entre 2021 et 2050 :

1. Scénario d'augmentation (sans atténuation) : il correspond aux projections de la FAO pour 2050 en l'absence d'intervention. Il reflète une hausse de la demande mondiale en protéines animales (+21 % d'ici 2050) et donc des émissions.

2. Scénario de réduction (avec atténuation) : il est basé sur les « trajectoires à faibles émissions » de la FAO. Il inclut des interventions comme l'amélioration de l'alimentation et de la santé animale, la sélection génétique, la réduction des pertes et gaspillages, la

bioéconomie circulaire et la meilleure gestion du fumier. Ces mesures d'atténuation sont le fruit d'une analyse documentaire exhaustive présentée dans le rapport de la FAO. La trajectoire a été établie à partir des valeurs initiales des émissions de CH₄ et de N₂O (2021) et d'un taux de diminution constant (en moyenne -2 % par an) pour atteindre les valeurs finales des émissions de GES estimées pour 2050. La diminution globale prévue pour 2050 est de 63 % pour le CH₄ et de 59 % pour le N₂O.

3. Scénario constant : hypothèse d'émissions stables au niveau de 2021, sans changement majeur ni atténuation.

II.3. Conversion en équivalents CO₂

Les valeurs de CH₄ et N₂O ont été converties en équivalents CO₂ selon deux approches :

- PRG₁₀₀ (GWP₁₀₀) : méthodologie standard du GIEC, avec des facteurs de conversion de 28 pour le CH₄ biogénique et 265 pour le N₂O (sur 100 ans) (IPCC, 1990 et 2014) pour la conversion en équivalent CO₂ (CO_{2e}) classiquement utilisée
- PRG* (GWP*) : méthodologie spécifique aux polluants de courte durée, appliquée uniquement au

CH₄. Elle utilise l'évolution des émissions sur 20 ans pour la conversion en équivalent CO₂ (CO_{2we}) (Smith *et al.*, 2021). Pour le N₂O, les valeurs PRG* sont assimilées aux valeurs GWP₁₀₀.

Ainsi, pour chaque scénario, les émissions annuelles et cumulées ont été exprimées en CO_{2e} (en utilisant le PRG₁₀₀) et en CO_{2we} (en utilisant le PRG*).

II.4. Estimation de l'impact sur la température

L'impact des émissions sur la température mondiale a été évalué en utilisant le coefficient TCRE (Transient Climate Response to Cumulative Emissions), selon lequel chaque millier de gigatonnes (Tt) de CO₂ cumulé provoque une augmentation moyenne de 0,45 °C

(intervalle 0,27–0,63 °C). Ainsi, les émissions cumulées en équivalents basés sur le CO_{2e} ou le CO_{2we} ont été multipliées par le TCRE pour estimer l'évolution de la température (Cain *et al.*, 2021).

II.5. Estimation des besoins en élimination du CO₂

Pour chaque scénario, les besoins en élimination du CO₂ nécessaires ont été calculés comme la quantité de CO₂ à retirer de l'atmosphère pour atteindre la condition de « pas de réchauffement supplémentaire » d'ici 2050.

- Avec le PRG₁₀₀, la neutralité climatique correspond à une réduction linéaire des émissions de CH₄ et N₂O vers zéro d'ici 2050.
- Avec le PRG*, la neutralité climatique ne nécessite pas de « zéro émission de CH₄ » : des émissions stables

sont compatibles avec une température constante, puisque le méthane est continuellement dégradé.

Le besoin en élimination du CO₂ a donc été calculé comme la différence entre les émissions projetées de chaque scénario et celles de la trajectoire de référence « pas de réchauffement supplémentaire », selon la métrique considérée (Brazzola *et al.*, 2021).

III. RESULTATS

Les premiers résultats concernent l'effet de l'utilisation de deux métriques différentes pour décrire l'impact sur la température des émissions mondiales

de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) issues de l'élevage, selon les scénarios FAO 2050 (Tableau 1).

Table 1. Résumé des valeurs d'émission de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O), des émissions correspondantes en équivalent CO₂, des accumulations d'émission et des valeurs de variation de température, calculées avec les méthodes PRG₁₀₀ et PRG*, et appliquées à trois scénarios d'émission différents : croissant, constant et décroissant.

item	Première valeur de référence	Début du scénario	Fin du scénario		
			Augmentation	Constant	Réduction
	1990	2021	2050	2050	2050
Emissions de CH ₄ (Mt)	98.3	112.2	178.8	112.2	41.8
Emissions de N ₂ O (Mt)	3.2	4.0	4.7	4.0	1.7
<i>Emissions en équivalent CO₂¹</i>					
CH ₄ (Gt) CO _{2e}	2.75	3.14	5.01	3.14	1.17
CH ₄ (Gt) CO _{2we}	2.58	2.55	7.00	0.88	-4.20
N ₂ O (Gt) CO _{2e}	0.84	1.06	1.25	1.06	0.44
<i>Emissions totales en équivalent CO₂¹</i>					
TOT (Gt) CO_{2e} (CH ₄ (Gt) CO _{2e} + N ₂ O (Gt) CO _{2e})	3.59	4.20	6.26	4.20	1.61
TOT (Gt) CO_{2e} + CO_{2we} (CH ₄ (Gt) CO _{2we} + N ₂ O (Gt) CO _{2e})	3.42	3.61	8.25	1.94	-3.76
<i>Emissions cumulatives</i>					
PRG cumulative (Gt) CO _{2e}		117.81	268.35	239.64	194.80
PRG* cumulative (Gt) CO _{2e} + CO _{2we}		84.41	262.70	155.09	11.76
<i>Variation de températures</i>					
À partir du PRG, °C		0.053	0.121	0.108	0.088
À partir du PRG*, °C		0.038	0.118	0.070	0.005

¹CO_{2e} correspond à la méthode PRG₁₀₀, CO_{2we} correspond à la méthode PRG*

III.1. Scénario d'augmentation (sans atténuation)

Dans le scénario « business-as-usual » (BAU), les émissions de CH₄ passent de 112 à 179 Mt/an entre 2021 et 2050, et celles de N₂O de 4,0 à 4,7 Mt/an.

• L'agrégation des émissions annuelles en CO_{2e} (PRG₁₀₀) et en CO_{2we} (PRG*) montre que les valeurs sont proches en 2050.

• Les émissions cumulées correspondent à un réchauffement d'environ +0,121 °C avec le PRG₁₀₀ et +0,118 °C avec le PRG* (Tableau 1).

III.2. Scénario constant

Lorsque les émissions de CH₄ et N₂O restent stables par rapport au niveau de 2021 :

• Le PRG₁₀₀ indique des émissions annuelles constantes (~4,2 GtCO_{2e}/an), tandis que le PRG* montre une tendance décroissante puis une stabilisation (~1,9 GtCO_{2we}/an en 2050).

• En termes cumulés, le PRG₁₀₀ anticipe un réchauffement de +0,108 °C en 2050, contre seulement +0,070 °C avec le PRG* (Tableau 1) avec une contribution significative du N₂O par rapport au CH₄.

III.3. Scénario de réduction (avec atténuation)

Dans le scénario FAO de baisse des émissions grâce à des mesures d'atténuation :

• Le PRG₁₀₀ montre une réduction des émissions annuelles de 4,2 Gt à 1,7 GtCO_{2e}, mais les émissions

cumulées continuent de croître, impliquant un réchauffement supplémentaire d'environ +0,09 °C.

• En revanche, le PRG* reflète la baisse réelle du CH₄: les émissions cumulées chutent à ~12 GtCO₂we, et

l'impact climatique s'atténue progressivement jusqu'à revenir à un niveau proche de zéro en 2050 (+0,005°C).

III.4. Besoins en élimination de CO₂

Les besoins d'élimination du CO₂ atmosphérique nécessaires pour compenser les émissions excédentaires diffèrent fortement selon la métrique (Figure 1) :

• Avec le PRG₁₀₀:

- Scénario constant : besoin croissant jusqu'à 4,2 GtCO₂e/an en 2050.

- Scénario BAU : besoin atteignant 6,26 GtCO₂e/an en 2050.

o Scénario avec atténuation : encore une dette carbone de 1,6 GtCO₂e/an en 2050.

• Avec le PRG* :

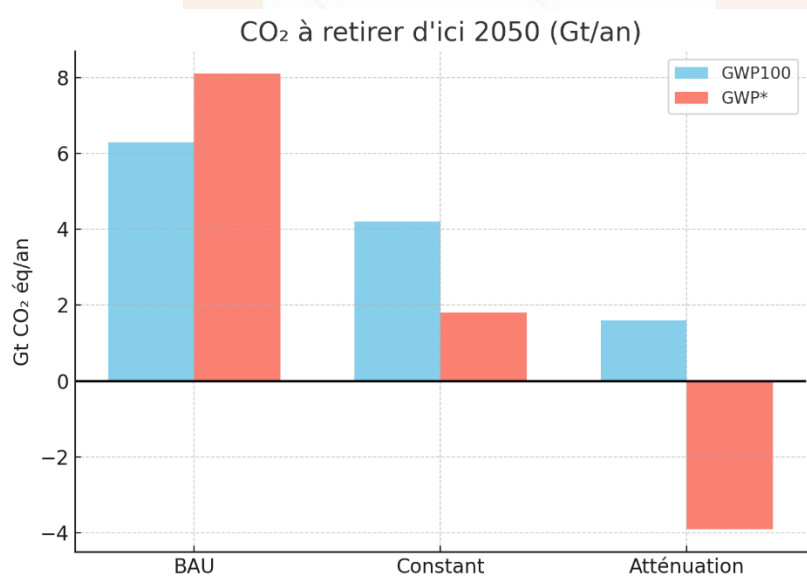
- Scénario constant : besoin limité à 1,83 GtCO₂we/an en 2050.

- Scénario BAU : besoin plus élevé, atteignant 8,14 GtCO₂we/an en 2050.

- Scénario mitigation : bilan négatif (-3,9 GtCO₂we/an), ce qui signifie que le secteur de l'élevage générerait des crédits carbone excédentaires.

Figure 1. Quantité annuelle de CO₂ à retirer d'ici 2050 (Gt/an) pour compenser les émissions de CH₄ et de N₂O de l'élevage mondial selon trois scénarios de la FAO (BAU, constant, atténuation), calculée avec deux métriques :

PRG₁₀₀ (barres bleues) et GWP* (barres rouges). Les résultats montrent que le choix de la métrique influence fortement l'estimation des besoins en élimination de CO₂, le PRG₁₀₀ surestimant les retraits nécessaires dans les scénarios constant et d'atténuation, alors que PRG* reflète mieux la dynamique du méthane et peut même indiquer un potentiel de crédits carbone.



IV. DISCUSSION

IV.1. Influence du choix de la métrique

Les résultats montrent clairement que le choix de la métrique modifie profondément l'évaluation de l'impact climatique de l'élevage. Le PRG₁₀₀ tend à exagérer l'effet du méthane sur l'augmentation de la température moyenne lorsque les émissions sont stables ou en baisse, et à le sous-estimer lorsqu'elles augmentent. À l'inverse, le PRG* reflète différemment la relation réelle entre émissions de CH₄ et réchauffement, en tenant compte de sa nature de polluant de courte durée.

Ces divergences entraînent des conséquences significatives sur l'estimation des besoins en

élimination de CO₂ comme préalablement soulignés par des travaux antérieurs (Allen *et al.*, 2016 ; Shine, 2009; Del prado *et al.*, 2023). Dans le scénario constant, par exemple, le PRG₁₀₀ prévoit 4,2 GtCO₂/an des besoins en élimination de CO₂, soit plus du double de ce qu'indique le PRG* (1,8 GtCO₂/an). Cela signifie que l'usage exclusif du PRG₁₀₀ pourrait imposer des objectifs de compensation irréalistes et disproportionnés au secteur de l'élevage si les émissions globales diminuent, ce qui est le cas notamment en Europe. Ces résultats confirment l'importance de relier les choix méthodologiques aux

objectifs de température. Comme l'ont montré Cain *et al.* (2021), l'usage d'indicateurs dynamiques permet une meilleure cohérence avec la réponse climatique transitoire (TCRE). De plus, l'analyse de McAuliffe *et*

al. (2023) souligne que l'application exclusive du PRG₁₀₀ aux systèmes agroalimentaires peut biaiser l'évaluation de leur empreinte climatique.

IV.2. Neutralité climatique et émissions de méthane

Un point essentiel est que la neutralité climatique ne requiert pas nécessairement zéro émission nette de méthane. Avec des émissions stables, le CH₄ issu de l'élevage n'accroît pas davantage la température mondiale, puisqu'il est continuellement éliminé de l'atmosphère par oxydation. Ainsi, selon la méthode utilisant le PRG*, l'élevage pourrait maintenir des

émissions constantes de méthane tout en restant compatible avec l'objectif de stabilisation du climat. En revanche, selon la méthode utilisant le PRG₁₀₀, une trajectoire de réduction linéaire vers zéro s'impose, ce qui conduit à surestimer le rôle des compensations. Cette approche peut induire en erreur les décideurs et créer une pression excessive sur les filières animales.

IV.3. Scénarios d'atténuation

Si on considère que la métrique PRG* doit être utilisée, les résultats montrent qu'avec des mesures d'atténuation efficaces concernant différents secteurs (alimentation, santé animale, sélection génétique, gestion des effluents, réduction du gaspillage, etc), l'élevage peut atteindre une quasi-neutralité

climatique en 2050, voire générer des crédits carbone. Cela souligne que des stratégies d'atténuation réalistes peuvent réduire fortement l'empreinte climatique du secteur de l'élevage, sans exiger un objectif inatteignable de « zéro méthane ».

IV.4. Implications politiques et économiques

Le choix de la métrique influence la manière dont sont répartis les efforts de réduction et les coûts associés à l'élimination du CO₂ atmosphérique. Dans les pays industrialisés, une partie des technologies d'atténuation des émissions est déjà disponible et applicable. Dans les pays en développement, où la demande en produits animaux augmentera le plus, la stabilisation des émissions grâce à une amélioration progressive des pratiques pourrait suffire à éviter un réchauffement supplémentaire.

Une mauvaise évaluation des besoins d'élimination du CO₂ atmosphérique peut fausser les politiques climatiques internationales. En surestimant l'impact du méthane, le PRG₁₀₀ pourrait imposer une charge disproportionnée aux éleveurs et détourner des ressources financières et technologiques d'autres secteurs fortement émetteurs de CO₂. Le PRG*, en revanche, offre une base plus équitable et scientifiquement robuste pour concevoir des politiques climatiques adaptées.

IV.5. Limites de l'étude

Cette analyse repose sur les projections FAO et sur l'hypothèse d'un taux constant d'évolution des émissions entre 2021 et 2050. Les incertitudes liées aux paramètres climatiques (comme le TCRE) et aux scénarios socio-économiques ne sont pas intégrées en

détail. De plus, le PRG* tend à légèrement augmenter l'impact des scénarios où les émissions de CH₄ augmentent fortement. Malgré ces limites, les tendances générales restent robustes et cohérentes avec la physique du climat.

V. CONCLUSIONS

Cette étude montre que l'évaluation de l'impact climatique de l'élevage dépend fortement de la métrique retenue pour convertir les émissions en équivalents CO₂.

- Le PRG₁₀₀, largement utilisé, a tendance à surestimer l'impact du méthane lorsque les émissions sont stables ou en baisse, et à le sous-estimer lorsqu'elles augmentent.
- Le PRG*, reconnu par le GIEC comme plus adapté aux polluants de courte durée, reflète plus fidèlement la relation entre évolutions des émissions de CH₄ et évolution de la température.

Nos résultats montrent qu'il n'est pas nécessaire d'atteindre un niveau de zéro émission nette de méthane pour stabiliser les effets de l'élevage sur le réchauffement climatique : des émissions constantes peuvent être compatibles avec un objectif de « pas de réchauffement supplémentaire ».

Dans le scénario d'atténuation proposé par la FAO, l'élevage pourrait même atteindre une quasi-neutralité climatique en 2050, voire générer des crédits carbone, selon la méthode utilisant le PRG*. Cela signifie que, moyennant l'application de stratégies de réduction réalistes, l'élevage peut contribuer efficacement à la

limitation du réchauffement, tout en répondant à la demande croissante en protéines animales.

Ces résultats ont des implications majeures pour les politiques climatiques : ils suggèrent que l'adoption du

PRG* permettrait une répartition différente des efforts d'atténuation et des coûts associés aux besoins d'élimination du CO₂ atmosphérique, en particulier entre pays développés et pays en développement.

Références

Allen MR, Fuglestvedt JS, Shine KP, Reisinger A, Pierrehumbert RT, Forster PM (2016). New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Climate Change*. 6(8):773–6

Brazzola N, Wohland J, Patt A (2021). Offsetting unabated agricultural emissions with CO₂ removal to achieve ambitious climate targets. *PLoS One*. 16(3):e0247887. PMID:33730045

Cain M, Shine K, Frame D, Lynch J, Macey A, Pierrehumbert R, et al (2021). Comment on 'Unintentional unfairness when applying new greenhouse gas emissions metrics at country level'.

Del Prado A, Lynch J, Liu S, Ridoutt B, Pardo G, Mitloehner F (2023). Animal board invited review: Opportunities and challenges in using GWP* to report the impact of ruminant livestock on global temperature change. *Animal*; 17(5):100790.

FAO. Methane Emissions in Livestock and Rice Systems (2022) – Sources, Quantification, Mitigation and Metrics (Draft for Public Review). Rome, Italy: FAO. <https://www.fao.org/3/cc2468en/cc2468en.pdf>

FAO. Pathways towards lower emissions – A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems (2023). Rome, Italy: FAO.

FAOSTAT, statistical database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations ("FAO"). [cited 10 December 2024]. Available from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data>

IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press; 2391 p. Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change: the intergovernmental panel on climate change scientific assessment. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1990.

IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Paris: OECD; 1997.

IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories (2000). In: Penman J, et al. editors. Hayama: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit.

IPCC. Background papers, IPCC expert meetings on good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. IPCC-NGGIP; 2002.

Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). In: Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Hayama, Japan: IGES.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC; 2014.

Lynch J, Cain M, Pierrehumbert R, Allen M. (2020). Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and longlived climate pollutants. *Environmental Research Letters*. 15(4):044023

McAuliffe GA, Lynch J, Cain M, Buckingham S, Rees RM, Collins AL, Allen M, Pierrehumbert R, Lee MR, Takahashi T (2023). Are single global warming potential impact assessments adequate for carbon footprints of agri-food systems? *Environmental Research Letters*. Jul;18(8):084014.

Smith MA, Cain M, Allen MR (2021). Further improvement of warming-equivalent emissions calculation. *NPJ Climate and Atmospheric Science*. 4(1):19.

Shine KP (2009). The global warming potential—the need for an interdisciplinary retrieval. *Climatic Change*. 96(4):467–72.