Comportement du méthane dans l'atmosphère et analyse des enjeux techniques du PRG100 et du PRG* - application au secteur des ruminants en France et en Europe. AScA, Oxford Martin School, Cranfield University, rapport pour l'OFB, 2025, 44p.

Xavier Poux, Myles Allen, Michelle Cain, Vikas Patel

▶ **To cite this version:**

Xavier Poux, Myles Allen, Michelle Cain, Vikas Patel. Comportement du méthane dans l'atmosphère et analyse des enjeux techniques du PRG100 et du PRG* - application au secteur des ruminants en France et en Europe. AScA, Oxford Martin School, Cranfield University, rapport pour l'OFB, 2025, 44p.. AScA. 2025, 44p. hal-05033353

HAL Id: hal-05033353
https://hal.science/hal-05033353v1

Submitted on 7 May 2025

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

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

Comportement du méthane dans l'atmosphère et analyse des enjeux techniques du PRG_{100} et du PRG* - application au secteur des ruminants en France et en Europe

Note de synthèse dans le cadre de l'étude : *Analyse des métriques climat et conséquences sur la compréhension de la contribution des ruminants au changement climatique et sur l'agenda de conservation de la biodiversité*

Le contenu de ce rapport scientifique n'engage que ses auteurs et ne constitue pas nécessairement le point de vue l'OFB

Xavier Poux, AScA

Avec la contribution de Myles Allen (Oxford Martin School), Michelle Cain et Vikas Patel (Cranfield University)

Avril 2025

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes, qui ont bien voulu relire des versions intermédiaires de ce rapport et ont contribué à en améliorer la compréhension :

Sabine Bonnot, Solid Grounds

Stéphane Marchandeau, OFB

Jérôme Millet, OFB

Jean-Louis Peyraud, INRAE

Leurs contributions actives ne signifient pas que ce document engage leur responsabilité sur le fond d'une quelconque manière.

Identifiant HAL : hal-05033353 , **version 1** (14-04-2025)

RÉSUMÉ

Les ruminants sont souvent perçus négativement en raison de leurs émissions de méthane, un gaz à effet de serre puissant mais à courte durée de vie. Pourtant, ils jouent un rôle clé dans la conservation des prairies et des milieux ouverts, essentiels à la biodiversité, en particulier en Europe où l'élevage extensif a façonné les paysages depuis des siècles. Une mauvaise compréhension de l'impact réel du méthane peut conduire à des décisions politiques qui négligent les enjeux tant climatiques que biodiversité. Ce rapport, commandé par l'Office Français de la Biodiversité (OFB), analyse les limites du PRG_{100}, la métrique actuellement utilisée pour comptabiliser les émissions, et propose le PRG* comme complément d'interprétation pertinent.

Principaux constats :

1. Le méthane : un gaz à effet de serre à courte durée de vie
   - Le méthane demeure dans l'atmosphère une douzaine d'années, contre plusieurs siècles pour le CO_2.
   - Son effet réchauffant est très fort à court terme, mais il ne s'accumule pas dans l'atmosphère.
   - Le critère clé pour comprendre l'impact d'un régime d'émission de méthane sur le changement de température à un moment donné est donc sa *variation* sur quelques décennies, qui détermine celle de sa concentration atmosphérique et donc l'impact final sur la température.
   - Des émissions croissantes de méthane conduisent à un réchauffement ; des émissions décroissantes (de plus de 10% en 30 ans) conduisent à un effet refroidissant.
2. Les limites du PRG_{100}
   - Le PRG100 est la métrique la plus communément utilisée pour approcher le changement climatique. Il exprime les émissions de méthane en "équivalent CO_2", sans tenir compte de sa courte durée de vie. Il assimile donc le méthane à un gaz à effet de serre à longue durée de vie.
   - Il surestime l'effet des émissions stables ou en baisse et sous-estime celui des émissions en forte hausse.
   - Cela peut mener à des politiques climatiques mal calibrées en termes de priorités, par gaz et par secteurs.
3. L'apport du PRG*
   - Le PRG* permet de mieux rendre compte de la physique du méthane et intègre la courte durée de vie du méthane et la dynamique des émissions sur 20 ans pour estimer un impact sur la température.
   - Il offre une meilleure évaluation de l'impact climatique réel d'un secteur émetteur de méthane, dont l'agriculture, sur le climat.
   - Il permet de mieux éclairer les priorités d'action entre les différents gaz à effet de serre.
   - Il est reconnu comme une métrique valide dans les travaux du 6ème rapport du GIEC.
4. Un changement de focus pour l'agriculture européenne : le rôle du protoxyde d'azote
   - En Europe, les émissions de méthane du secteur agricole ont diminué depuis les années 1990.
   - En raison de la baisse des émissions de méthane en Europe, le protoxyde d'azote (N_2O), issu principalement des engrais agricoles, devient le principal facteur réchauffant du secteur agricole.
   - Une meilleure prise en compte de ce gaz est essentielle pour définir des stratégies climatiques efficaces, prenant mieux en compte les moyen et long termes.
5. Implications pour l'agriculture et la biodiversité
   - L'élevage de ruminants extensif, en particulier en Europe, contribue à préserver la biodiversité en maintenant des prairies permanentes et des habitats naturels. Il contribue également au bouclage des cycles biogéochimiques et celui de l'azote en particulier.
   - Une approche climatique plus précise permettrait d'éviter des politiques qui pénaliseraient l'élevage durable, au détriment du climat et d'autres enjeux environnementaux.
   - La question de l'évaluation du potentiel de « compensation » des émissions de méthane par les ruminants par le stockage de carbone dans les prairies change de nature quand on considère qu'il n'y a pas nécessairement de réchauffement à compenser quand les émissions baissent.

Le choix des métriques utilisées pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre influence profondément les stratégies climatiques. Le PRG*, en intégrant mieux la dynamique du méthane, offre une approche plus juste et adaptée aux réalités du secteur agricole européen. Il permettrait de mieux hiérarchiser les enjeux climatiques en équilibrant la réduction du méthane avec celle du protoxyde d'azote et du CO_2, tout en préservant la biodiversité et une agriculture durable.

SUMMARY

Ruminants are often viewed negatively because of their emissions of methane, a powerful but short-lived greenhouse gas. Yet they play a key role in the conservation of grasslands and open landscapes, which are essential for biodiversity, particularly in Europe, where extensive livestock farming has shaped semi-natural habitats for centuries. A poor understanding of the real impact of methane can lead to political decisions that neglect both holistic climate and biodiversity issues. This report, commissioned by the French Office for Biodiversity (OFB), analyses the limitations of GWP_{100}, the metric currently used to account for emissions, and contemplates GWP* as a relevant complement.

Main findings:

1. Methane: a short-lived greenhouse gas
   - Unlike CO_2, which persists for centuries, methane has a lifespan of about twelve years.
   - Its warming effect is very strong in the short term, but it does not accumulate in the atmosphere.
   - The key criterion for understanding the impact of a methane emissions regime on temperature change is therefore their variation over a few decades, which determines that of its atmospheric concentration and therefore the final impact on temperature.
   - Increasing methane emissions lead to warming; decreasing emissions (by more than 10% in 30 years) lead to a cooling effect.

2. Shortcomings of GWP_{100}
   - GWP100 is the most commonly used metric to approach climate change. It expresses methane emissions in 'CO_2 equivalent', without taking into account its short lifespan. It therefore assimilates methane to a long-lived greenhouse gas.
   - It overestimates the effect of stable or falling emissions and underestimates that of sharply rising ones.
   - This can lead to poorly designed policies in terms of priorities, by gas and by sector.

3. The contribution of GWP*
   - GWP* provides a better account of the physics of methane and incorporates the short lifespan of methane and the dynamics of emissions over 20 years to estimate an impact on temperature change.
   - It offers a better assessment of the real climate impact of a methane-emitting sector over time, including agriculture, on the climate.
   - It provides a better understanding of the priorities between the different greenhouse gases.
   - It is recognised as a valid metric in the work of the 6th IPCC report, which leaves the choice of metric open depending on the stated climate and sectoral objectives.

4. A change of focus for European agriculture: the role of nitrous oxide
   - In Europe, methane emissions from the agricultural sector have decreased since the 1990s.
   - Due to the fall in methane emissions in the EU27, nitrous oxide (N_2O), mainly coming from agricultural fertilisers, is becoming the main warming factor in the European agricultural sector.
   - Better consideration of this gas is essential to define effective climate strategies, taking better account of the medium and long term climate impacts.

5. Implications for agriculture and biodiversity
   - Extensive ruminant farming in Europe, helps to preserve biodiversity by maintaining permanent grasslands and natural habitats. It also contributes to the closing of biogeochemical cycles, particularly that of nitrogen.
   - A more precise approach to climate would make it possible to avoid policies that penalise sustainable livestock farming, to the detriment of the climate and other environmental issues.
   - The question of assessing the potential for 'offsetting' methane emissions by ruminants through carbon storage in grasslands changes in nature when one considers that there is not necessarily any warming to be offset when emissions fall.

The choice of metrics used to measure greenhouse gas emissions has a profound influence on climate strategies. By better integrating methane dynamics, GWP* offers a science-based approach that is better suited to the challenges of the European agricultural sector. It would make it possible to prioritise climate issues more effectively by balancing the reduction of methane with that of nitrous oxide and CO_2, while preserving biodiversity and sustainable agriculture.

INTRODUCTION : LES ENJEUX D'UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DU COMPORTEMENT DU MÉTHANE DANS L'ATMOSPHÈRE POUR L'AGENDA DE DURABILITÉ DES RUMINANTS EN EUROPE 1

Préalable : un cadrage européen 1

L'ambivalence des ruminants dans les approches de la durabilité agricole européenne 2

Un questionnement des métriques courantes pour les gaz à effet de serre à courte durée de vie, dont le méthane 3

L'écriture et l'organisation du présent rapport 4

COMPRÉHENSION DES IMPACTS CLIMATIQUES DES GAZ À EFFET DE SERRE ET DE LA MANIÈRE DONT LES MÉTRIQUES EN RENDENT COMPTE – LES PRG 6

Un premier regard sur des émissions de GES et des concentrations croissantes – le poids du méthane et du protoxyde d'azote 6

Des gaz à effet de serre aux comportements très différents 10

La métrique historique : le PRG_{100} 12
Le pouvoir de réchauffement global à 100 (ou 20) ans 12

Les erreurs d'interprétation liées à l'usage du PRG100 14

Le PRG* : principes et modalités de calcul 17

La validation théorique du PRG* 19

APPROCHES DE L'IMPACT CLIMATIQUE DE L'ÉVOLUTION DES RUMINANTS ET DE L'AGRICULTURE DANS L'UNION EUROPÉENNE ET EN FRANCE ET CONSÉQUENCES SUR LA HIÉRARCHIE DES ENJEUX 24

Quels impacts sur le climat de l'évolution des émissions de l'agriculture européenne et française ? Comparaison des conclusions tirées du PRG100, de la modélisation et du PRG* 24
Un regard sur l'historique des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture européenne et française 24
Modélisation des impacts sur la température des émissions de l'agriculture de l'Union Européenne à 27 sur trois périodes temporelles 27
Comparaison modélisation et PRG* - retour sur le PRG_{100} 29

Quelles conséquences de la prise en compte de la durée de vie du méthane dans l'agenda climatique de l'agriculture européenne ? 30
Un rééquilibrage entre méthane et protoxyde d'azote dans les objectifs de réduction des GES et la communication politique afférente 30
Un nouveau regard sur les prairies permanentes 32
Des options agri-climatiques à tester de manière globale 32

CONCLUSION : ENJEUX DE MEILLEURE PRISE EN COMPTE DE LA COURTE DURÉE DE VIE DU MÉTHANE : LES ÉCHELLES DE CLÔTURE SYSTÉMIQUE 34

ANNEXE : LISTE DES PERSONNES INTERROGÉES ET ATELIERS D'ÉCHANGES AUTOUR DU PRG* 39

INTRODUCTION : LES ENJEUX D'UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DU COMPORTEMENT DU MÉTHANE DANS L'ATMOSPHÈRE POUR L'AGENDA DE DURABILITÉ DES RUMINANTS EN EUROPE

Préalable : un cadrage européen

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre d'une commande de l'Office Français de la Biodiversité portant sur « *l'Analyse des métriques climat et conséquences sur la compréhension de la contribution des ruminants au changement climatique et sur l'agenda de conservation de la biodiversité* ». Compte tenu notamment du champ des missions de l'OFB et de la nécessité de cadrer des enjeux au croisement des agendas climatiques et agroécologiques ayant une portée régionale (au sens géopolitique, où l'Union Européenne est considérée comme une région), les pages qui suivent sont centrés sur une perspective européenne dans la compréhension du secteur des ruminants et des enjeux agro-environnementaux[1]. Plusieurs considérants à ce cadrage :

- Un contexte éco-géographique particulier, qui distingue l'Europe des autres régions du monde quant au rôle des ruminants dans la gestion des espaces agricoles et des ressources naturelles. Les Habitats naturels communautaires, par exemple, s'inscrivent dans ce contexte éco-géographique où l'élevage domestique extensif a pu jouer un rôle majeur dans la conservation de milieux ouverts. Cette contribution spécifique des herbivores domestiques européens jouant un rôle écologique similaire à celui de ceux sauvages depuis plusieurs millénaires (Pearce et al., 2023) ne se retrouve pas posée de la même manière dans d'autres régions tempérées (Amérique du nord par exemple) voire, *a fortiori*, tropicales où la contribution de l'élevage à la gestion des milieux ouverts, positive ou négative selon les cas, se pose en des termes différents qu'en Europe (Afrique sub-saharienne par exemple).
- Un ensemble de politiques publiques, celui de l'Union Européenne, à considérer conjointement dans la prise en compte des enjeux climatiques, agricoles et environnementaux, avec des objectifs définis à cette échelle. Ce cadre politique global est celui dans lequel s'inscrit l'action de l'OFB, en articulation avec d'autres politiques nationales comme la Stratégie Nationale Bas Carbone en particulier.
- Un système agri-alimentaire dont le fonctionnement d'ensemble s'analyse à l'échelle de l'Union Européenne, mieux qu'à un niveau strictement national. En particulier, les dynamiques à la baisse depuis plusieurs décennies sur le cheptel des ruminants dans les différents états membres – dont la France – se comprennent mieux en prenant en compte les évolutions conjointes des différents bassins de production à cette échelle, dans une visée historique. Ce considérant est d'importance dans un dossier où les émissions de méthane sont centrales et ne peuvent se comprendre qu'en considérant une production et une consommation de lait et de viande qui « boucle » mieux, dans l'ensemble, à cette échelle européenne plutôt qu'à des échelles nationales. Ce niveau permet d'éviter des erreurs d'analyse liées à des transferts d'impacts mal compris, entre consommation importée ou production exportée mal comptabilisées.

Si ce niveau européen est posé d'emblée pour bien comprendre l'analyse conduite ici, deux précisions importantes :

- Dans ce rapport portant sur les enjeux théoriques et méthodologiques de la compréhension des impacts climatiques du secteur des ruminants, nous ne rentrerons pas dans le détail des points évoqués ci-dessus. Nous nous contentons de les évoquer pour justifier l'analyse au niveau européen, mais sans approfondir davantage leur contenu technique, économique et politique pour nous concentrer sur notre objet. Nous prendrons ainsi les dynamiques d'émissions de méthane liées à l'élevage européen et français comme des données d'ensemble dont ne chercherons pas à détailler les causes dans ce rapport.
- Pour autant, les enjeux climatiques ne sont pas, eux, cantonnés à un ensemble géographique. Le réchauffement climatique est un dossier global et les considérants sur le comportement des différents gaz à effet de serre et les modèles et métriques en rendant compte ont une portée universelle. Si nous déclinerons ces approches aux

[1] Les problématiques ultra-marines sont une partie importante des missions de l'OFB, mais elles ne sont pas de fait concernées par les impacts des ruminants. Ces derniers sont par contre une variable clé pour la biodiversité en France métropolitaine.

entités France et Union Européenne dans ce document, les principes de base qui permettent cette déclinaison sont bien génériques et à comprendre comme tels. Plus précisément, la baisse constatée des émissions de méthane des agricultures française et européenne s'inscrit dans un contexte plus global de hausse très problématique des émissions de ce gaz au niveau mondial. Une discussion s'ouvre sur l'interprétation à donner à cette divergence, dont le sens ne se révèle pleinement qu'une fois qu'on a bien posé la compréhension des enjeux climatiques.

L'ambivalence des ruminants dans les approches de la durabilité agricole européenne

Historiquement, les chevaux et les ruminants – bovins majoritairement pour ces derniers, mais aussi ovins et caprins - ont été une composante centrale des systèmes polyculture-élevage qui, dans leur diversité, formaient la matrice de l'agriculture européenne jusqu'à l'après-guerre[2] et dont il reste des formes dans de nombreuses régions d'Europe (Oppermann et al., 2012). Cet héritage historique explique une première vision portée sur le rôle que les ruminants peuvent et doivent jouer pour contribuer à une durabilité agricole d'ensemble. Via leur rôle potentiel dans le bouclage des flux de nutriments et de conservation de paysages et d'habitats semi-naturels ouverts, tout un champ de travaux les identifie comme une composante incontournable à l'atteinte d'un agenda agri-environnemental multifonctionnel, à condition d'envisager l'évolution vers des systèmes extensifs et herbagers (Poux & Aubert, 2022).

La montée en puissance et en visibilité des enjeux liés au réchauffement climatique a contribué à mettre en avant les impacts négatifs de ces ruminants sur le climat, via leurs émissions de méthane. À l'opposé de la vision précédente, constatant les hausses alarmantes des émissions de ce gaz au niveau global et de son impact très rapide sur le réchauffement, la baisse drastique des émissions est perçue comme une priorité[3], rendant difficile des approches nuancées.

Ces deux visions renvoient à des réponses contrastées, sinon opposées quant à la réponse aux deux questions clés suivantes, en grande parties liées :

- Une question sur l'enveloppe du cheptel : quelles sont les évolutions du cheptel européen, en nombre de têtes, compatibles avec l'atteinte des objectifs climatiques et environnementaux ? Faut-il accélérer la baisse déjà à l'œuvre ?
- Une question plus qualitative et renvoyant aux performances unitaires, mesurées à l'échelle de l'animal : quelles sont les formes d'élevage souhaitables, entre évolution vers la réduction des émissions par animal et en arrière-plan l'intensification (qui permet de baisser le nombre d'animaux en limitant la baisse de production de lait en particulier et d'améliorer le bilan GES par kilo) ou l'extensification ?

Quelles que soient les réponses apportées à ces questions – qui feront l'objet d'un autre rapport à venir - nous faisons le constat que les analyses mobilisées à l'appui de telle ou telle vision donnent un poids éminent au méthane dans l'analyse des enjeux. Or, comme l'a analysé (Lynch et al., 2021), l'immense majorité des travaux conduits par les experts dans ces domaines – agriculture, environnement, économie, politiques publiques - reposent sur une mauvaise compréhension de la manière dont les émissions de méthane ont un impact sur le réchauffement.

« *Fuglestvedt et al. (2000) ont noté "il est loin d'être sûr que les décideurs politiques soient conscients de l'importance de prendre en compte les différentes durées de vie [des GES] et des lacunes associées à la méthode du PRG_{100}". Nous partageons ces mêmes préoccupations en ce qui concerne les chercheurs qui travaillent sur la durabilité environnementale et alimentaire, où, dans de nombreux cas, les mesures d'émissions sont utilisées de manière au mieux ambiguë et au pire positivement erronée. On devrait porter plus d'attention à l'usage des différentes métriques [climat] et de leurs limites, par rapport à différents objectifs* »[4].

[2] Pour donner un ordre de grandeur, il y avait à la sortie de la dernière guerre mondiale 16 millions de têtes de bovins, 7 millions d'ovins et 2,4 millions d'équins (source : Larousse 1952).

[3] Avec deux propositions alternatives associées : (i) les autres fonctions historiquement liées aux ruminants pourraient, dans cette vision, être obtenues sans eux vs. (ii) ces fonctions sont secondaires par rapport à l'urgence climatique (Bellasen, 2023).

[4] Notre traduction. Ce sera le cas pour toutes les autres citations tirées de travaux anglophones.

Cette mauvaise compréhension découle d'un usage courant, mais mal compris, de la métrique instituée mobilisée pour approcher les émissions de gaz à effet de serre, à savoir le PRG_{100} sur lequel nous reviendrons en détail dans ce document.

Un questionnement des métriques courantes pour les gaz à effet de serre à courte durée de vie, dont le méthane

On n'en a pas toujours conscience, mais le PRG_{100} est la métrique utilisée pour appuyer des constats tels que « *En France, les émissions du secteur de l'agriculture s'élèvent à 77 Mt éqCO_2 en 2021 et comptent pour 18 % des émissions totales de GES de la France (hors changement d'affectation des terres inclus dans le secteur UTCATF). Il s'agit du deuxième secteur émetteur en France derrière les transports. Atteindre une neutralité des émissions pour stabiliser le réchauffement planétaire nettement sous 2 °C nécessite à la fois une réduction rapide des émissions de CO_2 mais aussi des GES hors CO_2. 85 % des émissions de GES de l'agriculture sont constitués de méthane et de protoxyde d'azote, qui ont un pouvoir de réchauffement global plus élevé que celui du dioxyde de carbone […]. En 2021 en France, le méthane (CH_4) représente 56 % des émissions de ce secteur, suivi du protoxyde d'azote (N_2O) à hauteur de 29 %, et du dioxyde de carbone (CO_2) à hauteur de 15 %. L'agriculture est à l'origine de 69 % des émissions nationales de CH_4 et de 87 % des émissions nationales de N_2O. À l'inverse, l'agriculture est à l'origine de 4 % des émissions nationales de CO_2. » (Haut Conseil pour le Climat, 2024) ».*

Nous verrons en quoi une métrique permettant de comparer les émissions de gaz aux comportements aussi différents que les trois considérés ici – CH_4, N_2O et CO_2 qui sont ceux émis par l'agriculture – est indispensable. Mais nous verrons aussi que le raisonnement en équivalent CO_2 devient problématique quand il s'agit de passer d'une estimation des émissions à celle de l'impact de ces émissions sur le réchauffement pour un gaz à effet de serre dont la durée de vie dans l'atmosphère est courte, comme le méthane dont chaque molécule reste environ 12 ans dans l'atmosphère. Cette durée est à comparer à celle du CO_2 dont la durée de vie est, elle, de plusieurs centaines d'années. Nous verrons que l'approximation n'est pas problématique quant aux conclusions d'ensemble qu'on peut tirer tant qu'on raisonne au niveau global, où les émissions sont croissantes. Mais elle le devient quand on descend à des échelles régionales, quand les dynamiques d'émissions ne sont pas proches de la croissance *moyenne* à l'échelle globale, à la baisse (comme en Europe) ou à la hausse (comme en Afrique, Chine et Asie du sud) (Saunois et al., 2024). Nous verrons aussi que la distinction entre méthane biogénique (inclus dans les cycles naturels de l'ordre de la décennie (*Methane Emissions in Livestock and Rice Systems*, 2023)) et fossile est cruciale dans la mesure où les émissions finales de CO_2 qui résultent de la dégradation du méthane biogénique ne sont pas comptabilisées car elles proviennent elles-mêmes d'une fixation de CO_2 via la photosynthèse (IPCC, 2006). Précisons que cette distinction ne résulte pas de l'impact à court terme des émissions de méthane biogénique vs. fossile – cet impact est très proche tant que les molécules sont présentes dans l'atmosphère – mais de l'impact final qui, lui, résulte de la présence d'une nouvelle molécule de CO_2 (méthane fossile), ou non (biogénique).

L'erreur d'appréciation dans l'impact des émissions de méthane sur le réchauffement et la non prise en compte de son origine (fossile vs. biogénique) peut conduire à des priorités d'objectifs mal posées dans une perspective de déclinaison des objectifs globaux (Lynch et al., 2021) :

- Au sein du strict agenda climatique :
    - entre secteurs d'émissions (agriculture vs. autres secteurs économiques) et entre gaz au sein d'un même secteur (CH_4 vs. N_2O en particulier) ;
    - entre efforts de réduction des émissions et de changement d'usage des sols (optique stockage de carbone) ;
    - entre recherche de neutralité carbone d'une part et potentiel d'adaptation des systèmes agricoles de l'autre, objectifs entre lesquels il peut y avoir des tensions.
- Entre objectifs de réduction des émissions et ceux plus globaux d'usage des terres, de biodiversité et de considérants socio-économiques, avec un enjeu d'intégration de ces agendas à celui du climat et de déclinaison adaptée aux ensembles géographiques, sociaux et politiques considérés (Arneth et al., 2022; Harrison et al., 2024).

Ces considérations s'appliquent particulièrement dans l'analyse du secteur des ruminants en Europe, où une vision globale des enjeux climatiques et des autres limites planétaires s'impose (Campbell et al., 2017; Rockström et al., 2009).

L'écriture et l'organisation du présent rapport

Dans cette optique, le présent rapport vise à éclairer une composante clé du débat, portant sur la compréhension du comportement du méthane et sur les implications de cette compréhension sur la manière de poser les enjeux climatiques de l'agriculture européenne en général et des ruminants en particulier. Il aborde les points suivants :

- Le comportement physique des différents gaz à effet de serre dans l'atmosphère et ses conséquences sur la relation émissions ➔ changement de température, avec quelques généralités sur les émissions actuelles.
- Les bases historiques et méthodologiques du PRG_{100} et du PRG_{20} et la discussion critique quant à leur mauvaise capacité de prise en compte d'un gaz à courte durée de vie comme le méthane.
- L'exposé théorique et méthodologique d'une métrique complémentaire au PRG_{100}, le PRG*, développée récemment par une équipe du département de Physique de l'Université d'Oxford pour mieux prendre en compte cette courte durée de vie du méthane. Le présent rapport constitue à cet égard un porter à connaissance informé d'une métrique encore mal connue en France.
- La comparaison chiffrée, en émissions de GES et en Δ température, de la manière dont les métriques PRG_{100}, PRG_{20} et PRG* rendent compte des impacts climatiques de l'évolution du secteur des ruminants et plus généralement de l'agriculture en France et en Europe, en comparaison à un modèle climatique « *impulse-response* » utilisé .
- Sur la base du cas européen, la manière dont les différentes métriques cadrent différemment le débat sur l'agenda climatique pertinent pour l'agriculture européenne et française.
- La conclusion abordera les enjeux d'échelle dans la clôture des systèmes climatiques considérés : quelles questions se posent si l'on isole, ou non, l'agriculture européenne ou française dans la contribution à un changement climatique dont la manifestation est bien globale ? Ce rapport ne cherchera pas à y répondre, mais proposera une manière de poser le débat.

Ce rapport est écrit par Xavier Poux, agronome au sein du bureau d'études et de recherche AScA, avec la collaboration active de Myles Allen de l'Université d'Oxford (Royaume-Uni) et de Michelle Cain de l'Université de Cranfield (Royaume-Uni) [5]. Myles Allen et Michelle Cain sont des universitaires de haut niveau sur le climat et ont tous les deux contribué à la conception du PRG*. Ils ont également contribué à ce document en modélisant les impacts climatiques du secteur agricole européen et français, à l'aide d'un modèle d'impulsion-réponse, avec le précieux soutien de Vikas Patel pour le codage et la modélisation. Cette modélisation permet d'obtenir des résultats originaux jusqu'à présent, permettant la discussion sur l'utilisation des mesures PRG_{100} et PRG* pour l'Europe (UE27).

L'essentiel du matériau conceptuel présenté dans ce rapport s'appuie sur leurs travaux au sein de l'Université d'Oxford, inclus dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC (groupe I) de 2021. Xavier Poux assure ici un travail de traduction (au sens large) et d'explicitation pédagogique de ce contenu à destination d'un public expert français impliqué dans le débat agriculture, alimentation, climat qui, dans sa grande majorité, ne connaît pas bien les enjeux de prise en compte de la courte durée de vie du méthane et encore moins les bases du PRG* comme métrique complémentaire au PRG_{100}. Ce travail s'appuie sur sa connaissance du débat agri-environnemental acquise par l'activité professionnelle à AScA depuis plus de trente ans, sur un travail bibliographique sur le méthane et le PRG*, et sur une série de réunions et d'entretiens avec différentes parties prenantes expertes (cf. annexe). Ces dernières ont permis d'appréhender leur compréhension *a priori* des enjeux abordées dans ce document, et des questions posées quand elles prennent connaissance des nouveaux éléments portés à leur connaissance. C'est en ayant à l'esprit ces questionnements critiques que ce document est conçu, pour tenter d'y répondre de manière aussi pédagogique que possible.

[5] Myles Allen a contribué au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en tant qu'auteur principal du chapitre sur la détection du changement et l'attribution des causes. Il a contribué à la révision du chapitre sur les prévisions du changement climatique mondial pour le quatrième rapport d'évaluation du GIEC et est co-auteur du rapport spécial du GIEC du 8 octobre 2018 sur le réchauffement climatique de 1,5 °C.
Michelle Cain Le Dr Cain copréside le comité d'engagement scientifique de la Royal Meteorological Society et est vice-présidente du groupe consultatif technique sur le méthane de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Avant de rejoindre l'Université de Cranfield en 2020, le Dr Cain était chercheuse principale à l'université d'Oxford, où elle a développé le programme Oxford Martin sur les polluants climatiques (https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/pollutants), qui visait à rendre les mesures climatiques utilisées dans la politique climatique plus adaptées à leur objectif. Elle a obtenu deux bourses de l'université d'Oxford pour l'échange de connaissances, sur l'atténuation du changement climatique dans l'agriculture.

Ce rapport est donc une composante d'une réflexion plus globale qui abordera, dans le cadre du projet OFB sur l'analyse des métriques climat, la manière dont deux agendas agri-environnementaux contrastés (intensification efficiente vs. agroécologie) se trouvent éclairés par l'usage de telle ou telle métrique. Et plus particulièrement la manière dont la prise en compte de la courte durée de vie du méthane permet de résoudre le nexus biodiversité/climat européen, au cœur duquel la question des ruminants est centrale.

Rapport 1 : le comportement du méthane dans l'atmosphère, la manière dont les métriques PRG_{100} et PRG* en rendent plus ou moins bien compte (les bases scientifiques du PRG*), et ce que ça change sur la compréhension des enjeux climatiques de l'agriculture et de l'alimentation en Europe.

Rapport 2 : ce que change l'usage des métriques dans l'évaluation des performances des systèmes agrialimentaires européens. Comment le PRG*, solide scientifiquement, permet de justifier l'agroécologie mobilisant l'élevage extensif herbager comme la meilleure option pour le climat et la biodiversité.

COMPRÉHENSION DES IMPACTS CLIMATIQUES DES GAZ À EFFET DE SERRE ET DE LA MANIÈRE DONT LES MÉTRIQUES EN RENDENT COMPTE – LES PRG

Un premier regard sur des émissions de GES et des concentrations croissantes – le poids du méthane et du protoxyde d'azote

Le graphique suivant indique l'évolution des émissions de l'ensemble des gaz à effet de serre d'origine anthropique – hors aviation et transports maritimes[6] depuis la période préindustrielle, en utilisant la base de données Primap (Gütschow et al., 2024).

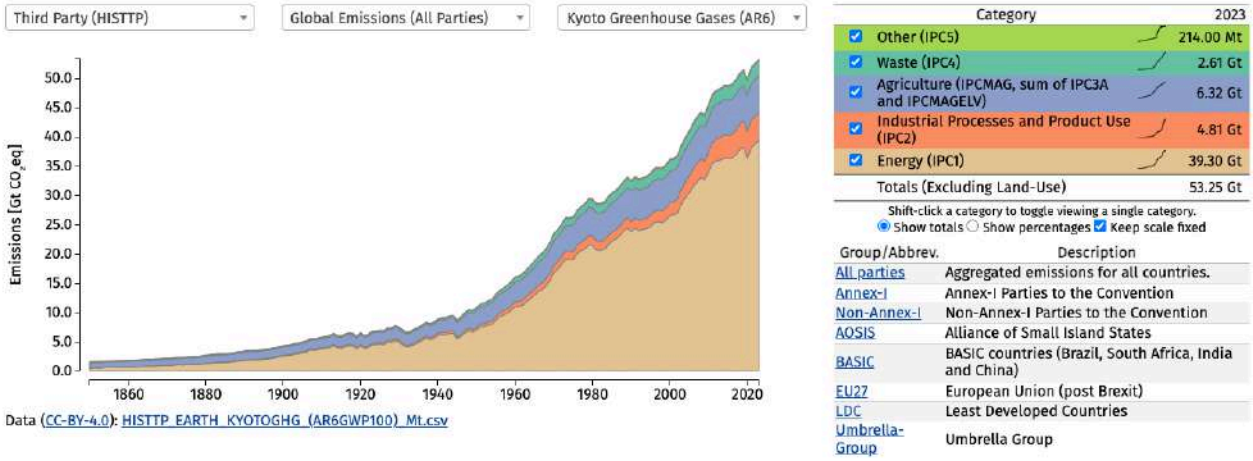


Figure 1 : évolution des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique par secteurs au niveau mondial depuis 1850, en CO_2-eq (Gütschow et al., 2024)

La part prépondérante de l'énergie, près des ¾ des émissions en 2023 se comprend comme la somme de tous les usages énergétiques dans des secteurs comme le transport, l'industrie, le chauffage et en ce qui nous concerne plus particulièrement dans le secteur agricole, la fabrication d'engrais chimiques, de pesticides et dans une proportion moindre, des équipements. La fraction « industrial processes and product use » dans le graphique comptabilise les émissions directement liées aux processus industriels en eux-mêmes, comme notamment le dégagement de CO_2 lié à la fabrication du ciment, indépendamment de l'énergie mobilisée. Depuis 1990, on est passé de 32,6 Gt de CO_2-éq à 53,2 soit une hausse alarmante de plus de 60%, sans signe d'infléchissement visible.

La répartition par gaz est fournie dans le graphique ci-dessous :

[6] - Environ 3% des émissions mondiales pour chaque secteur, soit 6% au total. L'aviation contribue davantage au réchauffement (plus de 5%) de par son effet dans l'atmosphère.

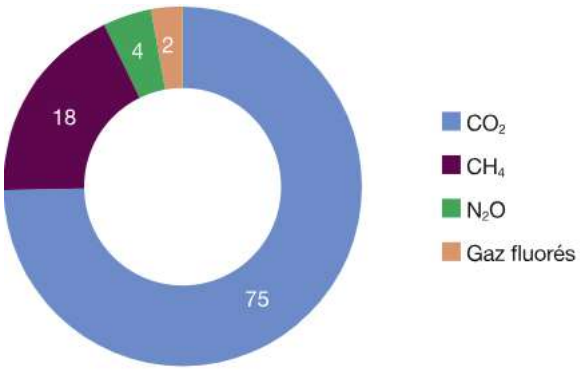


Figure 2 : répartition des émissions par gaz au niveau mondial en 2021, en CO_2-eq/PRG_{100} (source : SDES, d'après EDGAR, 2022) https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/5-panorama-mondial-des-emissions-de#:~:text=Avec%20le%20PRG%20%C3%A0%20100,6%20Gt%20CO2%20%C3%A9q.

Le graphique ci-dessous détaille les évolutions pour les trois principaux gaz à effet de serre

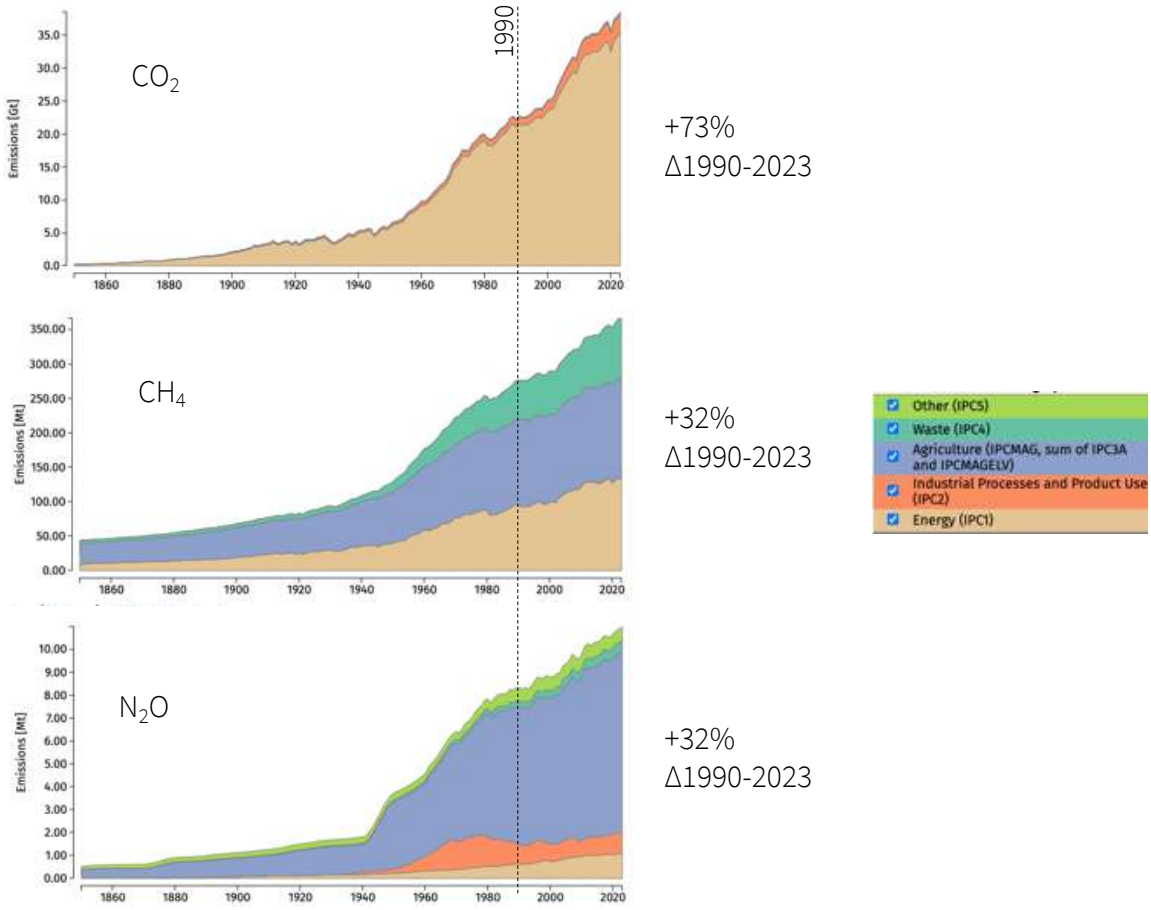


Figure 3 : évolution des émissions des 3 principaux gaz à effet de serre d'origine anthropique par secteurs au niveau mondial depuis 1850, en tonnes (Gütschow et al., 2024)

L'agriculture est prépondérante dans les émissions de méthane (CH_4) et encore davantage de protoxyde d'azote (N_2O). La base Primap ne comptabilisant que les émissions anthropiques, il faut les compléter par celles d'origine naturelle, qui représentent entre 1/3 et 40% des émissions pour le méthane avec les zones humides, les termites, les ruminants sauvages (auxquels se sont substitués partiellement les ruminants domestiques), les océans (Jackson et al., 2020; Saunois et al., 2024) et 60% pour le protoxyde d'azote. Cette part significative des émissions naturelles contribue à un écart entre des variations d'émissions anthropiques et celles de concentration dans l'atmosphère. Des réactions

chimiques dans l'atmosphère viennent de surcroît rendre un peu plus compliquée l'analyse des relations entre émissions, concentration dans l'atmosphère et impact sur le réchauffement.

Pour le méthane, qui nous concerne plus particulièrement dans ce rapport, la figure suivante montre l'évolution des concentrations sur les dernières décennies :

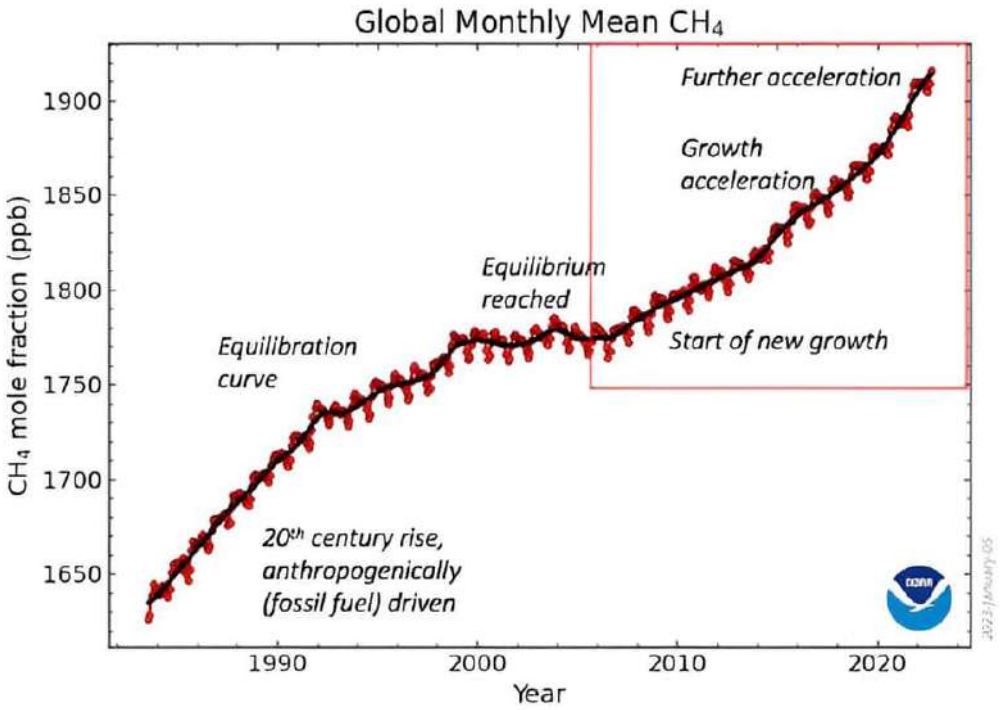


Figure 4 : évolution de la concentration moyenne mensuelle en méthane dans l'atmosphère, ppb [parties par billion], données NOAA network (Nisbet et al., 2023)

Si la croissance de la concentration en méthane depuis 1990 n'est « que » de 13% (passant de 1700 à 1920 ppb) en comparaison de la hausse de 30% de l'ensemble des émissions anthropiques, la tendance reste claire et la conclusion sans équivoque : cette hausse des émissions et des concentrations est très problématique pour le réchauffement du fait de l'impact réchauffant extrêmement rapide et fort du méthane. On rappellera ici le fait qu'à l'effet radiatif propre de la molécule de méthane se combinent d'autres induite par sa présence dans l'atmosphère, avec des effets précurseurs sur d'autres gaz et notamment l'ozone. Ainsi, le méthane est le second gaz ayant contribué au réchauffement global depuis la période 1850-1900 par rapport à l'actuelle (2010-2019) avec un effet moyen estimé à +0,5°C, contre +0,75 °C pour le CO2 (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023). Ce constat alarmant a conduit à l'initiative du « Global Methane Pledge » (GMP) lancée en marge de la COP26 en 2021 par la Climate and Clean Air Coalition (CCAC)[7]. Le GMP est un cadre volontaire aidant les nations partenaires à prendre des mesures pour réduire collectivement les émissions de méthane de 30 % par rapport aux niveaux de 2020 d'ici 2030. Pour la CCAC, cela pourrait éliminer plus de 0.2 °C de réchauffement d'ici 2050.

Pour le protoxyde d'azote, la tendance est plus régulière et également alarmante, avec également une tendance à l'accélération de la concentration sur les années récentes :

[7] https://www.ccacoalition.org/fr/content/global-methane-pledge consulté le 13/12/2024.

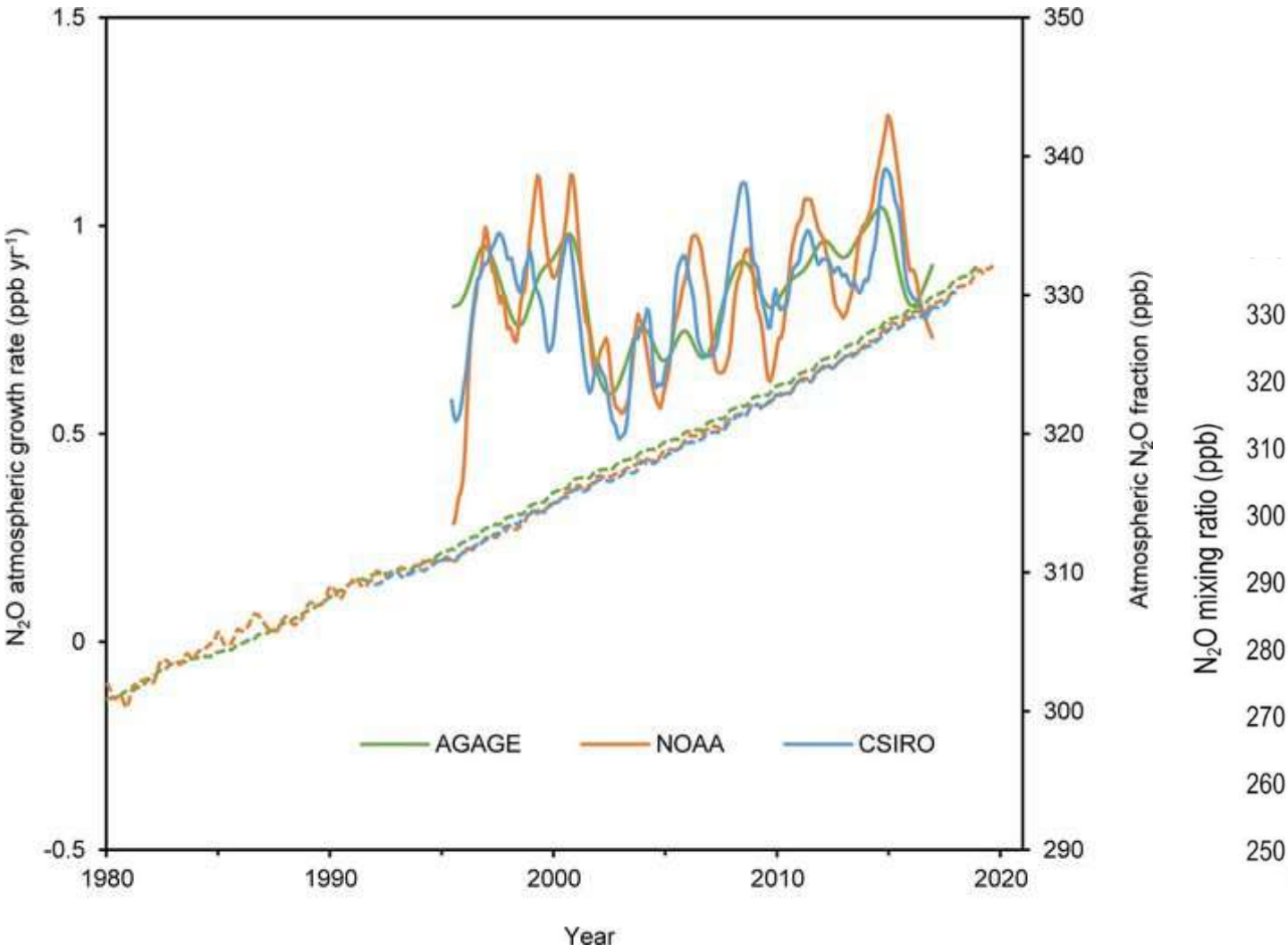


Figure 5 : Taux de croissance moyens mondiaux et concentration atmosphérique de N_2O (Tian et al., 2020) Les taux de croissance moyens mondiaux (lignes continues, de 1995 à 2017) et la concentration atmosphérique de N2O (lignes pointillées, de 1980 à 2017) proviennent des réseaux AGAGE[6] (vert), NOAA[5] (orange) et CSIRO (bleu). Les taux de croissance moyens mondiaux ont été calculés par intervalles de temps annuels et sont présentés sous forme de moyennes mobiles sur 12 mois.

Le protoxyde d'azote a un mode d'action différent du méthane sur le climat – point que nous aborderons dans les pages qui suivent – avec notamment des effets qui se révèlent plus lentement, mais qui durent à plus long terme.

Ce gaz ne fait pas encore l'objet d'un engagement international comparable à celui du Global Methane Pledge, même si les connaissances scientifiques sont mobilisées pour le mettre plus haut dans l'agenda des actions de réduction, comme par exemple l'initiative du Global Nitrous Oxide budget[8].

Ces constats sont indispensables pour rappeler les enjeux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans le cas particulier du méthane que nous développons plus particulièrement dans ce document, il est important de rappeler le contexte global de hausse des émissions, même si les dynamiques de ces émissions sont contrastées d'un continent et d'un secteur à l'autre[9]. Ils fondent les objectifs d'ensemble de réduction des gaz à effet de serre rappelés dans le rapport du GIEC de 2021 et repris dans la synthèse de 2023 :

[8] https://www.globalcarbonproject.org/nitrousoxidebudget/index.htm consulté le 13 décembre 2024.

[9] Les émissions du secteur agricole européen sont ainsi à la baisse depuis le milieu des années 1980 comme nous le développerons dans la section «

> « *D'un point de vue physique, limiter le réchauffement climatique induit par l'homme à un niveau spécifique nécessite de limiter les émissions cumulées de CO_2, d'atteindre au moins la neutralité carbone, ainsi que de réduire considérablement les autres émissions de gaz à effet de serre. Une réduction forte, rapide et durable des émissions de CH_4 permettrait également de limiter l'effet de réchauffement résultant de la diminution de la pollution par les aérosols et d'améliorer la qualité de l'air*. » (notre traduction, (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023)

Cette introduction somme toute classique sur des grands constats permet de repérer des aspects sur lesquels on passe le plus souvent sans s'attarder quand on aborde ce sujet :

- Comment comptabilise-t-on les émissions de gaz à effet de serre ?
- Comment compare-t-on les effets des différents gaz à effet de serre ?
- Quelle relation entre des émissions, une concentration et un réchauffement ?

Pour illustrer ces questions : alors que la Figure 2 indique un rapport de 18/75 (=24%) entre le poids du méthane face au CO_2 en 2021 concernant la répartition des émissions, la Figure 3 indique 276 Mt de méthane émis en 2023 contre 22 000 Mt CO_2 , soit un rapport de seulement 1%. Ce point juste pour rappeler que la phrase « tel gaz représente x% des émissions de GES » n'est pas un constat physique mais nécessite une pondération associée à un pouvoir réchauffant pour parler de CO_2-éq. Par ailleurs, les écarts entre les émissions, la concentration et la contribution au réchauffement à un instant donné invitent à mieux comprendre les relations de causalité résumées dans la figure suivante :

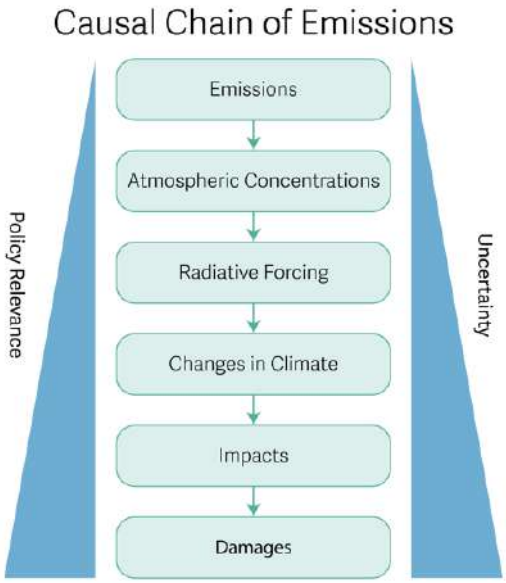


Figure 6 : une représentation des relations de causalité entre émissions, changement climatique, impact et dommages (Fuglestvedt, 2003). En résumé : les émissions ne sont que la première étape de l'analyse sur le changement climatique.

Des gaz à effet de serre aux comportements très différents

Ces constats d'ensemble sur les émissions de GES et le réchauffement procèdent de l'effet cumulé de différents gaz dont les comportements physico-chimiques sont très différents, comme le montre le tableau ci-dessous.

Approches de l'impact climatique de l'évolution des ruminants et de l'agriculture dans l'Union Européenne et en France et conséquences sur la hiérarchie des enjeux », p 22 et suivantes.

Gaz à effet de serre	Durée de vie atmosphérique (années)	Efficacité radiative (W m-2 ppm-1)	PRG_{100}
H_2O	Heures, mois	Non calculée	Non calculé
Dioxyde de carbone (CO_2)	Multiple (plusieurs siècles)	$1{,}33 \pm 0{,}16 \times 10^{-5}$	1
Méthane (CH_4)	11,8 ±1,8 ans	$5{,}7 \pm 1{,}4 \times 10^{-4}$	27,2 (biogénique) 29,8 (fossile)[10]
Protoxyde d'azote (N_2O)	109	$2{,}8 \pm 1{,}1 \times 10^{-3}$	273
PFC-14 (tétrafluorure de carbone, CF4)	50 000	$9{,}89 \pm 0{,}19 \times 10^{-2}$	7 380
HFC-23 (trifluorométhane, CHF3)	228	$1{,}9 \times 10^{-1}$	14 600
Hexafluorure de soufre (SF6)	1 000	$5{,}7 \times 10^{-1}$	24 300

Tableau 1 : caractéristiques des principaux gaz à effet de serre – source 6ème rapport du GIEC et (Hodnebrog et al., 2020)

Trois variables clés sont à prendre en compte en première analyse pour comprendre la manière dont un gaz contribue au réchauffement climatique :

- Sa concentration dans l'atmosphère, mesurée en partie par million (ppm)
- Son efficacité radiative, c'est à dire la quantité de chaleur stockée dans l'atmosphère quand une molécule du gaz reçoit une radiation solaire. Elle est mesurée en W/m2/ppm. Elle mesure le pouvoir réchauffant d'un gaz.
- Sa durée de vie, point essentiel sur lequel nous reviendrons en détail. Le tableau montre des valeurs extrêmement variables, qui distinguent des GES à courte durée de vie (en ce qui nous concerne dans le présent document : le méthane) de ceux à longue durée de vie (le CO_2 et le protoxyde d'azote N_2O).

Les valeurs du PRG varient dans chaque rapport d'évaluation du GIEC en raison des changements dans la concentration de fond du CO_2, qui augmente généralement l'effet relatif des gaz autres que le CO_2, des mises à jour des connaissances sur les effets physiques du forçage radiatif, des nouvelles connaissances sur les effets chimiques, en particulier les effets sur l'ozone et la vapeur d'eau stratosphérique, et des nouvelles évaluations des bilans du CH_4 et du N_2O, qui entraînent une diminution de leur durée de vie estimée (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, 2023).

Les valeurs du tableau sont données pour la période récente, mais elles sont réactualisées ou modélisées dans différentes hypothèses de concentration relative des différents GES. C'est ainsi que le PRG100 du méthane, qui dépend de son efficacité radiative et de celle du CO_2, est passée de 21 à 28 de 1995 à 2023[11].

Les dynamiques de concentration sont donc complexes et les modélisation doivent tenir compte des émissions de chaque gaz, de leur temps de présence dans l'atmosphère. La relation entre émission et impact sur la température (*change in climate*) n'est pas simplement directe et linéaire.

Les modélisations climatiques travaillent ainsi avec des hypothèses d'émissions pour chaque gaz, dont ils dérivent les concentrations, le forçage radiatif et le changement de température avec les effets induits sur les composantes du globe.

Encadré 1 : quelle est la durée de vie du méthane dans l'atmosphère ?

C'est une question plus compliquée qu'il n'y paraît et mérite clarification.

Il peut y avoir des compréhensions différentes, sur ce point découlant de définitions propres aux disciplines et approches concernées. En climatologie, la durée de vie *yr* est la durée à partir de laquelle les entrées de gaz dans le système

[10] Voir **Encadré 2**.

[11] https://prod-basecarbonesolo.ademe-dri.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?prg.htm

climatique sont compensées par les sorties naturelles (décomposition, fixation), autrement dit quand le système climatique est à l'équilibre et qu'il n'y a ni réchauffement, ni refroidissement. Après cette durée, la concentration d'une tonne de gaz émise à un instant t baisse significativement pour ne plus contribuer en lui-même au réchauffement (Ehhalt et al., 2001). Comme le méthane (et le CO_2) suivent des dynamiques de décroissance exponentielle, la durée de vie peut s'approcher comme le temps nécessaire pour qu'une émission initiale atteigne 1/e [~37%] de la valeur initiale[12]. De manière assez peu intuitive, la durée de vie d'un gaz selon cette approche n'est donc pas le temps que ce gaz reste effectivement dans l'atmosphère, même si après ce temps, sa concentration devient significativement plus faible.

Autre difficulté de compréhension liée à ce concept : les valeurs de durée de vie du méthane sont variables d'un rapport du GIEC à l'autre car elle dépend de la concentration en CO_2 avec laquelle elle est corrélée négativement. Le rapport de 2021 consacré aux GES à courte durée de vie indique 11,8±1,8 ans.

La variabilité des valeurs résulte d'une dynamique du méthane après son émission très complexe dans le détail : une fraction est directement captée par des bactéries du sol même si la majeure partie se retrouve dans l'atmosphère où elle est notamment décomposée par les radicaux -OH. Les dynamiques de transformation du méthane en CO_2 – le gaz dans lequel il se trouve in fine décomposé – dépendent dans le détail de la proportion des autres gaz présents dans différentes couches de l'atmosphère. Au total, la notion de durée de vie procède d'une agrégation moyenne de cycles très différents : dans certains, le méthane est très rapidement fixé (de l'ordre de la journée) sous forme de CO_2 ; dans d'autres cycles, ce peut être plusieurs dizaines d'année. Mais notons au passage que l'impact de ce même gaz peut perdurer au-delà de sa durée de vie de par ses effets induits sur d'autres gaz et sur des éléments à forte inertie thermique, comme l'océan par exemple (Solomon et al., 2010). Il faut au total comprendre qu'une molécule de gaz à effet de serre peut avoir un effet global qui dépasse sa durée de vie.

Cette valeur de 10 à 12 ans de la durée de vie climatologique est source de confusion car elle correspond aussi au nombre d'années après émission où il ne reste dans l'atmosphère qu'environ la moitié de la valeur initiale du méthane (en fait 37%). Soit une définition plus courante de la demi-vie en chimie ou en physique, mais dont la signification climatologique n'est pas établie. On ne trouve pas de mention de la demi-vie dans les travaux de climatologie, même si on peut la retrouver citée dans certains travaux qui, en dehors de cette discipline, interprètent cette notion compliquée de manière ambiguë en allouant cette valeur de 12 ans à une demi-vie du méthane (Couturier et al., 2022; Réseau Action Climat, 2017) qui reprennent (Laponche, 2020).

Pour notre propos, ces variations sur les durées de vie – même si on les appelle demi-vie - n'ont pas d'incidence sur le raisonnement et sur les conclusions : le méthane ne réside dans l'atmosphère que quelques décennies et voit son impact réchauffant décliner rapidement après une douzaine d'années. C'est ce qui importe et ce qui sera pris en compte dans le calcul du PRG*.

La métrique historique : le PRG_{100}

L'usage des indicateurs climat dans le débat, des experts aux médias qui le relaient, est devenu si courant qu'on ne le questionne plus. Et pourtant, dans le domaine qui est le nôtre, des décisions et des orientations politiques structurantes se prennent sur des constats comme « les ruminants émettent 30 % des GES, il est souhaitable de réduire le cheptel de 30% pour atteindre la neutralité carbone ». Ces affirmations cadrent un discours sur le futur souhaitable de l'alimentation et de l'énergie qui se traduit dans différentes composantes des politiques publiques.

Le pouvoir de réchauffement global à 100 (ou 20) ans

Les paramètres des modélisations sont difficilement manipulables dans l'espace politique et il est apparu nécessaire d'introduire une métrique plus simple pour fixer des objectifs dans les cycles de négociations autour du climat. L'objectif de lutte contre le réchauffement climatique étant global, il était pertinent de proposer une métrique simple et commune pour agréger en une seule grandeur des gaz aux comportements si différents et en approcher les impacts. C'est dans

[12] Pour en savoir plus (en anglais), on peut consulter : https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2019-128/essd-2019-128-AC3-supplement.pdf (consulté le 13 décembre 2024)

cette optique que le PRG_{100} a été proposé lors du protocole de Kyoto de 1997, pour proposer un étalon commun aux différentes parties dont les profils d'émissions n'étaient pas d'emblée comparables entre les pays fortement émetteurs de CO_2 fossile et ceux dans lesquels le méthane était relativement plus important. Cette métrique est donc le compromis nécessaire entre une ambition politique négociée et une pertinence scientifique. Elle s'est imposée depuis plus de 25 ans pour approcher l'impact sur le climat des activités humaines dans les orientations politiques et économiques.

Trois choix méthodologiques fondamentaux ont été faits :

- Considérer les émissions comme la grandeur pertinente, proxy satisfaisant de l'impact sur les températures au niveau global.
- Retenir le CO_2 comme étalon commun (d'où le CO_2équivalent).
- Adopter un horizon temporel de référence de 100 ans. Un horizon temporel est nécessaire pour pouvoir décliner la métrique comme nous l'expliquons ci-après.

Le calcul du PRG_{100} repose sur le raisonnement suivant : si j'émets une tonne d'un gaz à effet de serre donné, de quel facteur contribuera-t-il au réchauffement sur 100 ans avec comme convention que le CO_2 a une valeur de 1 sur cette durée ? Sa formule repose donc sur une intégrale sur 100 ans de gaz aux dynamiques temporelles variables. Cette harmonisation est précisément la simplification recherchée, à l'instar d'un calcul d'amortissement comptable en économie. Une tonne de méthane réchauffe ainsi 29 fois plus qu'une tonne de CO_2, une tonne de N_2O 290 fois, etc.

Le choix de 100 ans reflète aussi un compromis entre une réalité physique – les effets du réchauffement ne sont pleinement visibles qu'à moyen et long terme – et politique – il faut engager des transitions à court et moyen terme qui visent cet horizon de 100 ans ; il faut à la fois agir vite mais au regard de l'ampleur des changements donner un peu de temps aux transitions qui se donnent plusieurs décennies pour se développer comme la neutralité carbone à 2050 notamment.

Cette moyennisation sur 100 ans occulte de fait des dynamiques temporelles très différentes, c'est de fait son choix méthodologique pour simplifier les choses. Deux types de gaz sont ainsi agrégés dans l'équivalent CO_2 :

- les gaz à effet de serre à longue durée de vie, au premier rang desquels le CO_2, retenu comme étalon au titre de sa contribution majeure au réchauffement dont il reste la variable d'ordre 1, ont un effet de fond qui perdure et on parle « d'effet stock ». Pour le CO_2 et les gaz à effet persistant, le calcul sur une période de 100 ans occulte une contribution au réchauffement au-delà de cet horizon temporel.
- les gaz à effet de serre à courte durée de vie comme le méthane, qui ont un effet réchauffant extrêmement fort très peu de temps après leur émission (après, ils disparaissent et sur la fin de la période de 100 ans, ils sont « amortis » depuis longtemps). On parle de gaz à « effet flux ».

Le raccourcissement de la période de référence à 20 ans est parfois proposé pour mieux prendre en compte l'impact des GES à courte durée de vie, en premier lieu le méthane, dont l'effet flux à court terme est « dilué » sur une période de 100 ans, ce qui peut affaiblir l'urgence d'en réduire les émissions très rapidement. Le raisonnement est le même : on compare l'effet réchauffant d'une tonne de gaz sur 20 ans avec comme étalon le réchauffement d'une tonne de CO_2 sur cette période. Par construction, la période de référence plus courte augmente la contribution relative du méthane dont le PRG100 est d'environ 30 CO_2éq et le PRG_{20} 81 CO_2éq, plus de 2,5 fois plus élevé.

Si le PRG20 est en effet mieux calé pour rendre compte de l'effet flux du méthane et renforce le message politique d'agir rapidement, il ne rend pas mieux compte de l'impact relatif de ce gaz sur le réchauffement (avec des raccourcis comme « le méthane est en réalité près de trois fois plus dangereux qu'on le dit ») : ce qu'on gagne comme information à court terme, on le perd au-delà de la période de 20 ans, après laquelle l'effet réchauffant de ce gaz devient négligeable puisqu'il a déjà été comptabilisé, alors que celui du CO_2 a été tronqué sur 20 ans seulement quand il continuera à agir sur 80 ans (si on garde le PRG100 comme référence) voire au-delà. Physiquement, c'est le même gaz avec le même comportement et le même impact sur le climat qu'on estime avec le PRG_{100} et le PRG_{20}. C'est la ligne de compromis entre science et politique qui bouge, reflet du poids relatif donné aux différents gaz dans la lutte contre le changement climatique.

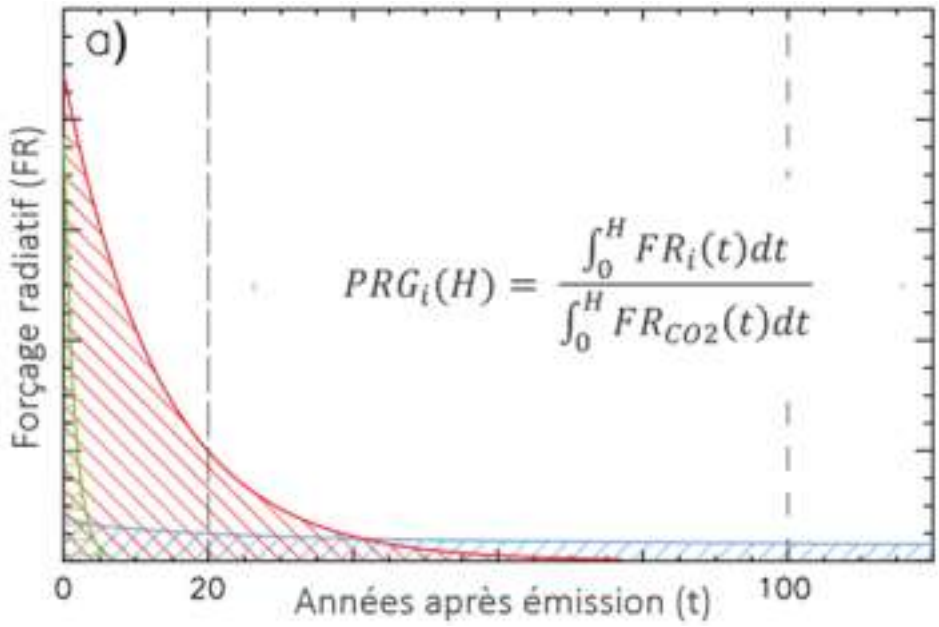


Figure 7 : Calcul du PRG d'un gaz i pour un horizon temporel H. L'aire bleue représente le forçage radiatif d'une émission de CO2 au temps t=0 cumulé sur une période donnée (par exemple 20 ans ou 100 ans selon les lignes verticales). Les aires en vert et rouge correspondent au forçage radiatif cumulé de gaz de durée de vie respective de 1,5 et 13 ans. Source : Adaptation Citepa de (Myhre et al., 2013)) (Citepa, 2024)[13].

Les erreurs d'interprétation liées à l'usage du PRG_{100}

À ce stade de l'exposé, la plus ou moins longue durée de vie des GES n'apparaît que comme un paramètre dans le calcul de l'intégrale du PRG100, sans conséquence sur sa signification physique. Mais tel n'est pas le cas, et il faut mieux tirer les conséquences de la courte durée de présence d'un GES dans l'atmosphère pour le comprendre.

Le schéma suivant permet de se représenter de manière simple l'impact de la durée de vie d'un gaz à effet de serre sur le climat :

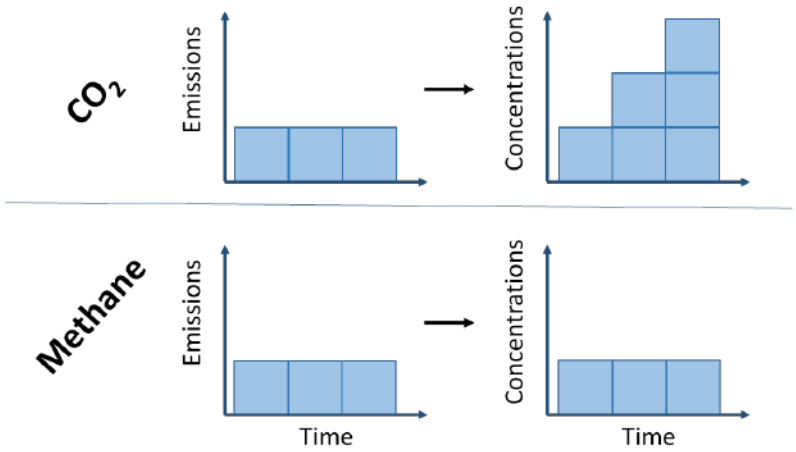


Figure 8 : relation entre niveau d'émission et concentration en fonction de la durée de vie d'un GES stock (CO2) ou flux (CH4) – repris de (Lynch, 2019)

[13] Le texte de la légende est intégralement repris du rapport Citepa cité en objet.

Chaque graduation sur l'axe horizontal de temps représente une période de temps donnée. Dans le cas du méthane, 12 ans, correspondant à sa durée de vie. Ce graphique se comprend logiquement ainsi :

- Pour le méthane, gaz à courte durée de vie, un niveau d'émission constant ne conduit pas à une accumulation dans l'atmosphère car les flux qui entrent sont compensés par ceux qui sortent sur la période donnée.
- Pour le CO_2, la longue durée de vie induit que les émissions à une période t+1 se rajoutent à celles qui persistent dans l'atmosphère issues des émissions de la période t, et ainsi de suite. Un niveau d'émission constant conduit à une accumulation dans l'atmosphère.

Le graphique suivant pousse établit la nature de la relation entre la dynamique d'émission du CO_2 et du méthane et le changement de température.

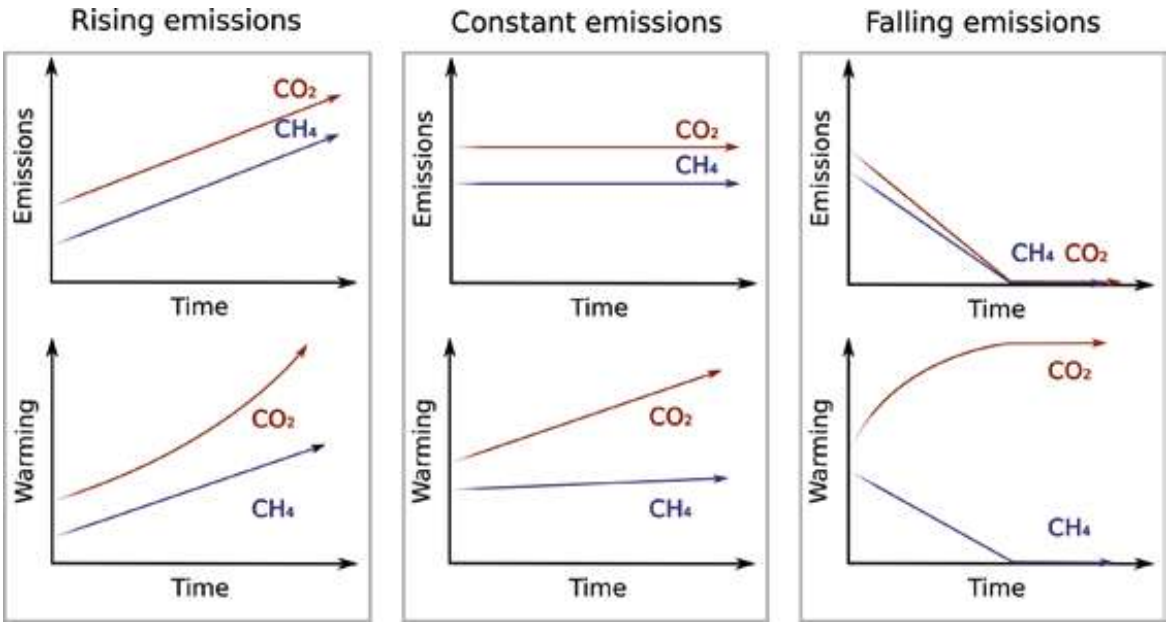


Figure 9 : relation entre niveau d'émission et réchauffement pour le CO2 et le méthane – repris de(Lynch, 2019)

On peut commenter ces courbes en partant la partie centrale de la figure, qui dérive directement de la figure précédente :

- À niveau d'émission constant au cours du temps, la température croît de manière linéaire pour le CO_2 (accumulation constante) et est *quasiment* stable pour le méthane. On note en première analyse une relation émissions => réchauffement très différente pour le méthane et le CO_2. La « quasi-stabilité » (et non la stabilité) s'explique par le fait que le méthane n'a pas qu'un effet à court terme sur la température, mais il induit également des effets inertiels par stockage de la chaleur dans les océans qui conduisent à un effet réchauffant d'ordre 2, mais présent, même à niveau d'émission constant (Solomon et al., 2010).
- L'importance de prendre en compte la courte durée de vie du méthane se comprend le mieux si on considère le cas d'émissions qui décroissent, à droite de la figure. Pour le CO_2, la décroissance conduit à une décélération du réchauffement, qui ne devient nul que pour des émissions qui sont également nulles. Mais il faut souligner que le passé ne se rattrape pas (le CO_2 émis dans le passé reste dans l'atmosphère) et que le mieux qu'on peut atteindre est la stabilisation des températures au point où les émissions de CO_2 deviennent nulles. Pour le méthane, la dynamique est différente : une baisse d'émission conduit à une baisse de concentration après la période correspondant à la durée de vie, et une baisse des températures après un temps de latence (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). On parle ici de *cooling effect* ou effet refroidissant.
- Le cas d'émissions croissantes, à gauche de la figure, se comprend sur le même raisonnement, même si les conclusions sont plus conformes en première apparence à l'intuition qu'on peut avoir des processus. La hausse des émissions pour le CO_2 correspond à une accélération au carré des températures (accumulation), alors qu'elle est linéaire pour le méthane (pas d'accumulation du fait de la courte durée de vie).

C'est le cas de la baisse des émissions de méthane qui révèle le mieux le problème consistant à raisonner en CO_2 équivalent. L'effet le plus fort sur le climat qu'on peut attendre d'une molécule de CO_2 fossile est de ne pas être émise et de ne pas réchauffer d'avantage l'atmosphère. Pour le méthane, il n'en est pas de même et la diminution des émissions conduit donc à un effet refroidissement, conceptuellement irreprésentable si on raisonne en CO_2eq avec le PRG_{100} (ou PRG_{20}). Il y a donc un problème de représentation physique par l'usage de ces métriques, dont nous verrons qu'il a des conséquences en matière de stratégie de lutte contre le réchauffement et l'intégration d'autres considérants, dont la biodiversité associée à l'élevage.

Il y a un problème de même nature avec l'hypothèse d'émissions stables : raisonner en CO2eq pour le méthane conduit à imputer un effet de réchauffement continu sur la température de l'émission d'une molécule, même bien après qu'elle aura disparu. On considérera ainsi à tort que stabiliser les émissions continue à réchauffer indéfiniment alors qu'en première analyse, l'effet réchauffant sur la température s'est fait sentir dans le passé – quand les émissions ont crû – mais il n'est plus significatif si un plateau d'émissions est atteint. Par contre, le réchauffement passé reste bien comptabilisé dans la température atteinte à un moment donné, même stabilisée.

Encadré 2 : distinguer le méthane biogénique et le méthane fossile

La dégradation d'une molécule de méthane dans l'atmosphère conduit à l'émission d'une molécule de CO_2 qui va elle entrer dans le pool global de CO_2 et donc au réchauffement. Mais il faut ici distinguer selon l'origine du méthane : fossile ou biogénique.

Dans le cas d'une origine fossile (gaz naturel), la molécule de CO_2 sera un apport net au stock de ce gaz ; l'atome de carbone combiné à deux d'oxygène ne se trouvait pas dans l'atmosphère et était auparavant stocké dans le sol. Pour une origine biogénique récente, cette molécule sera issue de la dégradation d'une chaîne carbonée ayant fixé une molécule de CO_2 par photosynthèse, conduisant donc à la soustraction initiale de ce gaz du stock atmosphérique. Le bilan total sur le CO_2 sera donc -1 +1 = 0. Ce raisonnement s'applique à tous les cycles du carbone biogénique, par exemple dans la combustion de biomasse dont l'impact final sur le climat est considéré comme neutre bien qu'elle émette du CO_2. Dit autrement : un ruminant ou un champ de riz ne créent pas de carbone ; les bactéries qu'ils accueillent ne font que le transformer dans un cycle dont il faut considérer l'intégralité.

On lit parfois qu'il n'est pas pertinent de distinguer l'impact sur le climat du méthane biogénique de celui fossile, dont la différence de PRG_{100} est faible : respectivement 27,8 CO_2eq ±11 pour le biogénique et 29,8 ±11 CO_2eq pour le fossile (IPCC 2021). Cette proposition doit se comprendre sur la fraction de temps où les deux formes de méthane résident dans l'atmosphère – leur impact est alors très proche – et à court terme – où l'impact relatif du réchauffement causé par le méthane « écrase » celui du CO_2 résiduel si on ne considère que 20 ou 30 ans - mais pas en ce qui concerne le bilan final sur le CO_2 et ses impacts à moyen et long terme.

Mais précisons ici que considérer l'hypothèse de la baisse ou la stabilité des émissions de méthane pour faire comprendre la nature physique du problème ne revient pas à affirmer que cette baisse, ni même cette stabilisation, sont aujourd'hui à l'œuvre au niveau global. Comme nous l'avons rappelé, le raisonnement théorique sur les métriques ne doit pas occulter cette réalité climatique alarmante : les émissions mondiales de méthane s'accroissent et accélèrent la hausse des températures et l'élevage de ruminants y contribue significativement. Dans ce cas de figure, on se retrouve dans une situation plus conforme avec ce que le PRG_{100} envisage : les émissions de méthane croissent, la température s'accroît également sous cet effet.

Au total : le PRG_{100} et le raisonnement en CO_2eq ne rend pas compte de la manière dont les gaz à effet de serre à courte durée de vie, dont le méthane en ce qui nous concerne, ont un effet sur le climat. Cette métrique sous-estime les effets sur la température d'une hausse des émissions de méthane d'un secteur et/ou d'un pays dont les émissions croissent le plus vite et surestiment en symétrie ceux d'un secteur et/ou d'un pays dont les émissions croissent moins vite, voire décroissent. Plus fondamentalement, elle empêche conceptuellement de comprendre les processus physique à l'œuvre en assimilant des gaz flux à un gaz stock. Elle rend confuse la signification même des impératifs de baisse des émissions de méthane : est-ce pour réduire la vitesse du réchauffement ? (ce qu'un raisonnement en CO_2eq permet d'espérer) ou bien est-ce pour viser un cooling effect permettant de compenser le réchauffement d'autres GES, et le CO_2 en premier lieu ? Ce n'est pas la même chose et les conséquences sectorielles, multifactorielles (climat-biodiversité) et temporelles (risque de gagner à court terme et de perdre à moyen et long terme) sont majeures et méritent d'être approfondies (M. R. Allen et al., 2016).

Encadré 3 : une précision sémantique : que signifie « réchauffer » ?

Une source de confusion dans la compréhension des enjeux peut procéder de la sémantique du mot « réchauffer/réchauffement ». On pourra tout à fait suivre le raisonnement qui précède sur l'impact refroidissant d'une réduction des flux de méthane et rester pourtant troublé·e *a posteriori* qu'on puisse néanmoins associer des émissions d'un gaz à effet de serre, même se réduisant, à une absence de réchauffement. Comment comprendre qu'un régime d'émission d'un gaz à effet de serre avec un potentiel radiatif aussi élevé que celui du méthane puisse ne pas réchauffer ?

La réponse est dans le dictionnaire, avec deux sens donnés au terme « réchauffement » :

[…]

2. Action de donner de la chaleur

3. Augmentation de la température

https://fr.wiktionary.org/wiki/r%C3%A9chauffement

L'émission d'une molécule de méthane donne effectivement de la chaleur au système atmosphérique (sens 2, qui renvoie au PRG_{100} qui mesure bien une charge énergétique), mais si elle s'inscrit dans un régime d'émission qui baisse, elle ne contribue pas à augmenter la température (sens 3, qui renvoie au PRG*). La difficulté de compréhension vient du fait qu'on confond une condition effectivement nécessaire (« pour augmenter la température, il faut apporter de la chaleur ») avec une condition suffisante : tout apport de chaleur ne conduit pas toujours à une augmentation de température dans un système ouvert où une partie de cette chaleur est dissipée et/ou une partie des molécules de méthane disparaît.

Nous pouvons ici citer (Lynch et al., 2020) dans les risques qu'ils identifient quant à l'usage du PRG_{100} :

« Utiliser le PRG_{100} pour orienter la stratégie d'atténuation du changement climatique pourrait être injuste, inefficace et dangereux. Injuste, car il n'établit pas de lien clair entre les émissions et la contribution au changement climatique, et pourrait conduire à s'attendre à ce que certains acteurs (émetteurs de méthane à long terme) doivent annuler leur réchauffement passé, tandis que d'autres (émetteurs de CO_2) doivent simplement limiter les augmentations de température futures. Inefficace, car elle surestimerait le niveau d'action nécessaire pour compenser les émissions de méthane à long terme, tout en sous-estimant les avantages potentiels à court terme de la réduction de ces émissions de méthane. Dangereuse, car elle peut largement sous-estimer les impacts de l'augmentation des émissions de méthane et masquer la nécessité fondamentale de parvenir à des émissions nettes de CO_2 nulles dès que possible, quelles que soient les mesures d'atténuation prises pour les polluants climatiques à plus courte durée de vie. »

C'est bien dans cette définition des objectifs et l'allocation des responsabilités et des marges de manœuvre pour les atteindre que ce joue tout le débat et a justifié le développement d'une métrique alternative au PRG100/PRG20, à savoir le PRG*.

Le PRG* : principes et modalités de calcul

Le PRG* - GWP* ou *global warming potential star* en anglais - est donc une métrique alternative au PRG_{100}, dont l'objectif est de mieux prendre en compte les gaz à effet de serre à courte durée de vie, compte-tenu des risques de mauvaise interprétation identifiés plus haut. Outre cet objectif scientifique, il souscrit aussi à un double objectif politique : celui d'avoir une méthode simple utilisable pour les reportings auprès des Nations Unies et être plus pertinent et précis dans la fixation des objectifs de lutte contre le changement climatique (M. Allen et al., 2018).

Le PRG* résulte de recherches menées par l'équipe de Myles Allen à l'Université d'Oxford depuis le milieu des années 2010. De manière similaire, il cherche à intégrer différents gaz à effet de serre dans une seule grandeur, mais en prenant mieux en compte les différences liées aux durées de vie. En alternative au PRG_{100}, il ne s'agit pas de mesurer un équivalent CO_2 dont on a vu les limites mais un équivalent-réchauffement (warming equivalent : we), toujours en référence au CO_2 (Cain et al., 2019a). L'idée générale est d'avoir une formule qui permette d'approcher au mieux la relation entre émission et impact sur le climat ; dit autrement une équation dont la courbe calculée est la plus proche possible des variations de température constatées dans le passé (paramétrage) et projetées avec les modèles climatiques. Alors que le PRG_{100}

repose sur une intégrale sur 100 ans de la quantité d'énergie apportée par l'émission d'une quantité de gaz à effet de serre en le comparant au CO_2, le PRG* cherche à mieux approcher l'effet final de cette émission sur la température :

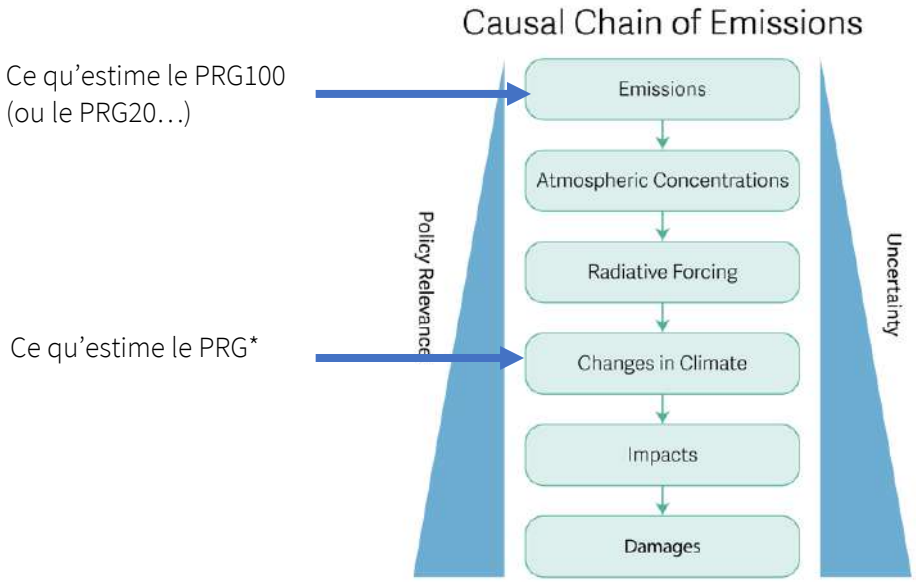


Figure 10 : le PRG100 et le PRG dans la chaîne causale du changement climatique (notre reprise de (Fuglestvedt, 2003)*

La formule générique du PRG* résultant des travaux successifs de raffinement pour intégrer les inerties thermiques est la suivante (Lynch et al., 2020) :

$$E_{CO_2} - w.e.(SLCP) = \left(r * \frac{\Delta E_{SLCP}}{\Delta t} * H + s * E_{SLCP}\right) * \mathrm{GWP}_H$$

Elle se lit comme :

> Pour un gaz à effet de serre à courte durée de vie, nommé SLCP dans l'équation[14], dont on mesure l'impact sur la température mesuré en référence à ce que réchaufferait une même quantité de CO_2 (notion de CO_2 w.e. donc),
>
> il faut prendre en compte une variation d'émission [ΔE_{SLCP}] sur un pas de temps donné [Δt], où l'émission à la fin de la période (soit le présent si on remonte de Δt dans le passé ; soit un horizon futur si on projette un impact à $+\Delta t$) est E_{SLCP},
>
> cet impact calculé résulte d'une fraction fixe, fonction d'un paramètre *s* dépendant du niveau d'émission E_{SLCP} à un moment donné, et d'une fraction prenant en compte la variation d'émissions sur la période de temps, affectée du coefficient *r* paramétrant la part relative de la variation dans l'impact sur le réchauffement, *s* rend compte de l'effet inertiel du réchauffement et des effets chimiques induits (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) : c'est le réchauffement constaté sous l'hypothèse d'une stabilité des émissions.[15]
>
> les calculs peuvent se faire en utilisant le PRG_H calculé pour ce gaz, où H représente donc un horizon temporel.

En première approche, cette formule peut apparaître compliquée car elle explicite tous les paramètres variables, mais si l'on fixe H à 100 ans (pour mobiliser le PRG_{100}), on peut simplement formuler :

> L'impact sur la température de l'émission d'un gaz à effet de serre à courte durée de vie à un moment donné est fonction de l'émission de ce gaz à ce moment donné et de la variation d'émission sur les 20 dernières années. H =

[14] SLCP : short lived climate pollutant = GES à courte durée de vie.

[15] *r* et *s* dépendent de la période de référence des calculs : ils n'ont pas la même valeur en 2024 qu'en 1750 ou dans les différents scénarios climatiques à 2100. On retrouve le besoin d'actualisation également nécessaire pour les PRG100/PRG20.

100 et *s* et *r* sont les paramètres qui permettent de caler l'équation pour mobiliser le PRG_{100} de manière simple dans le calcul.

La difficulté devient donc de paramétrer *s* et *r* de manière à ce que le PRG* soit le plus proche possible des températures calculées par les modèles climatiques de référence utilisés par les climatologues.

Dans sa version où le paramétrage est résolu, la formule proposée par l'équipe d'Oxford pour la période correspondant aux émissions contemporaines est donnée dans (M. A. Smith et al., 2021) :

$$E_{CO_2} - w.e.(SLCP) = (4.53 * E_{SLCP(t)} - 4.25 * E_{SLCP(t\ -\ 20)}) * GWP_{100}$$

En Français, on peut proposer :

$$PRG^{*}_{GES\ \text{à}\ courte\ durée\ de\ vie}[CH_4] = (4{,}53 * émissions\ année\ t - 4{,}25 * émissions\ \text{à}\ (t-20)) * PRG_{100}$$

$$= (128 * émissions\ année\ t - 120 * émissions\ \text{à}\ (t-20))\ pour\ PRG_{100}\ méthane = 28$$

Le calcul du PRG* une année donnée ne nécessite donc que deux valeurs : les émissions pour l'année de calcul et les émissions 20 ans auparavant. Ces données sont déjà calculées pour le reporting auprès de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques. L'usage du PRG100 dans la formule, métrique de référence, facilite de fait le calcul du PRG*. Le PRG* utilise ainsi les métriques existantes d'émissions, mais permet de bien mieux en interpréter l'impact effectif sur le climat des gaz à effet de serre à courte durée de vie en introduisant la *variation* des émissions sur 20 ans dans la métrique.

On retrouve au total l'objectif de simplification nécessaire à l'usage d'une métrique opérationnelle dans le débat et dans les calculs d'impacts sectoriels.

La validation théorique du PRG*

On l'a compris : les métriques sont des approximations simplifiées pour rendre compte de phénomènes climatiques complexes dont seuls les modèles peuvent rendre compte. Ceux-ci peuvent ainsi être considérés comme la référence. Leur principe est de rendre compte des dynamiques passées en fonction des lois physico-chimiques et des mesures des différents GES et relevés de température (paramétrage) afin de permettre des extrapolations dans le futur, pour décrire les différents scénarios climatiques. Dans les travaux de l'équipe d'Oxford, le modèle de référence utilisé est Fair V1.3 (C. J. Smith et al., 2018).

Dans cette perspective, l'approche développée dans (Lynch et al., 2020) consiste à comparer trois courbes résultant d'une même série d'hypothèses sur des dynamiques d'émissions de méthane sur 50 ans :

- La courbe de référence, indiquant le changement de température calculé par le modèle Fair V1.3. Cette courbe est indiquée en trait rouge pointillé dans les figures que nous reprenons, toutes tirées de la publication de 2020 citée ci-dessus ;
- La courbe rendant compte de l'évolution de la température en utilisant le PRG* (GWP* dans les figures), en trait bleu plein ;
- La courbe rendant compte de l'évolution de la température en utilisant le PRG100 (GWP100 dans les figures), en trait rouge plein

La question est donc celle de l'écart entre les courbes à trait plein (rouge PRG100 et bleue PRG*) et la courbe de référence indiquant le « vrai », en pointillé (Fair V1.3). La démonstration théorique se fait en considérant deux grands profils d'émission : stable et décroissants d'un côté ; croissants de l'autre.

La figure suivante résume le raisonnement et (ne) l'illustre (qu')avec le premier profil d'émissions considéré dans la discussion.

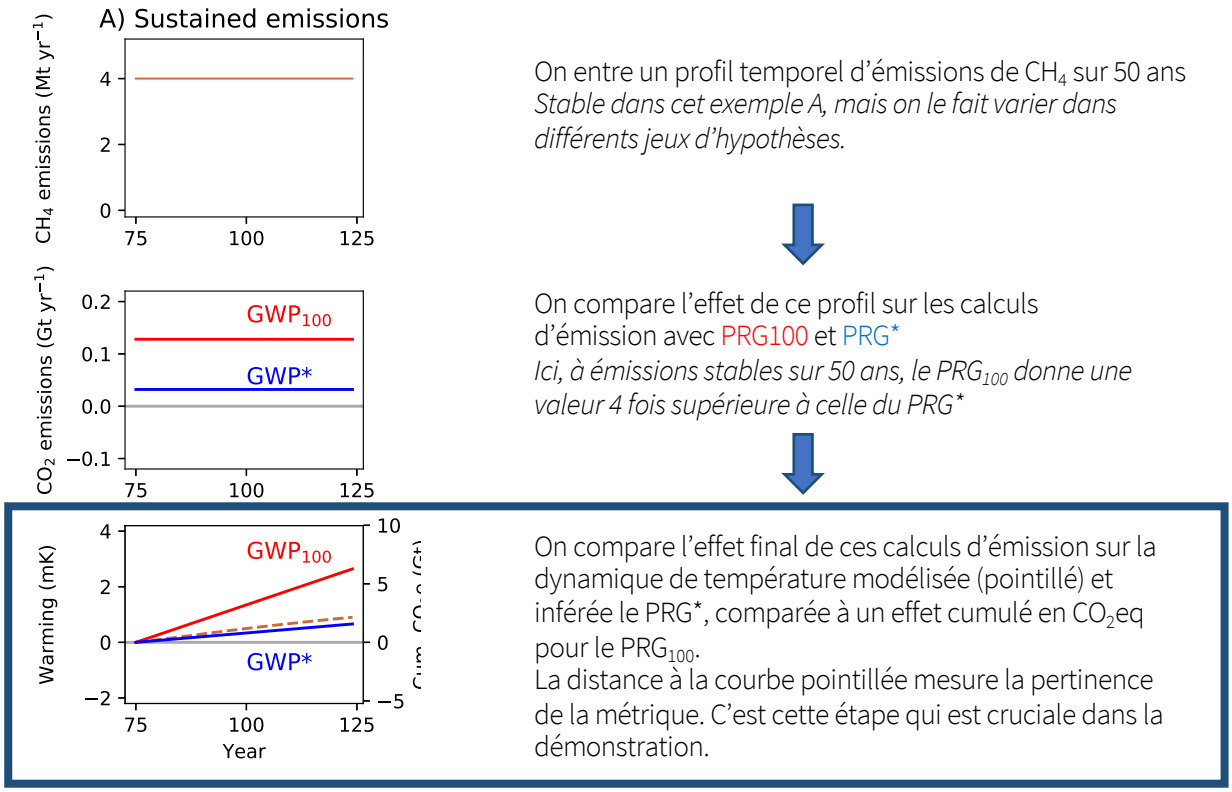


Figure 11 : méthode de validation du PRG conduite dans (Lynch et al., 2020), en comparaison du PRG100*

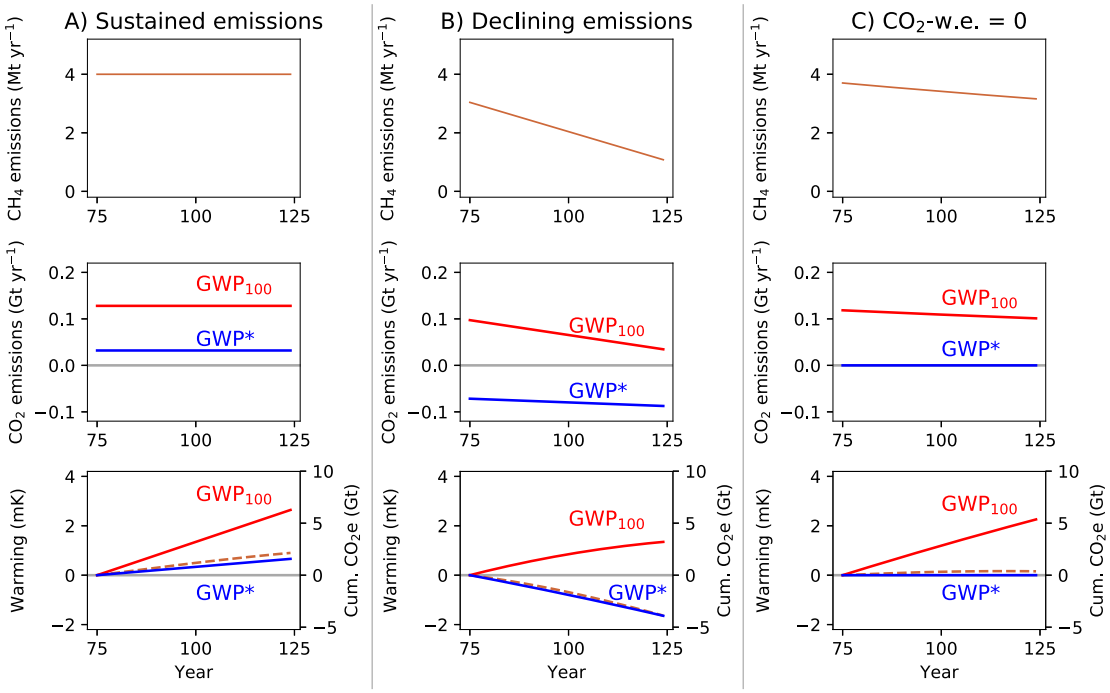


Figure 12 : validation du PRG dans le cas de profils d'émissions stables et décroissants (Lynch et al., 2020)*

Ces profils d'émissions sont ceux qui révèlent le mieux la différence de raisonnement et de conclusions induits par la prise en compte de la courte durée de vie du méthane. On note :

- La proximité des courbes de changement de température modélisé et du PRG*.

- Le fait que le PRG100 ne peut pas rendre compte d'un effet refroidissant, mais au mieux d'un moindre réchauffement (courbe B).

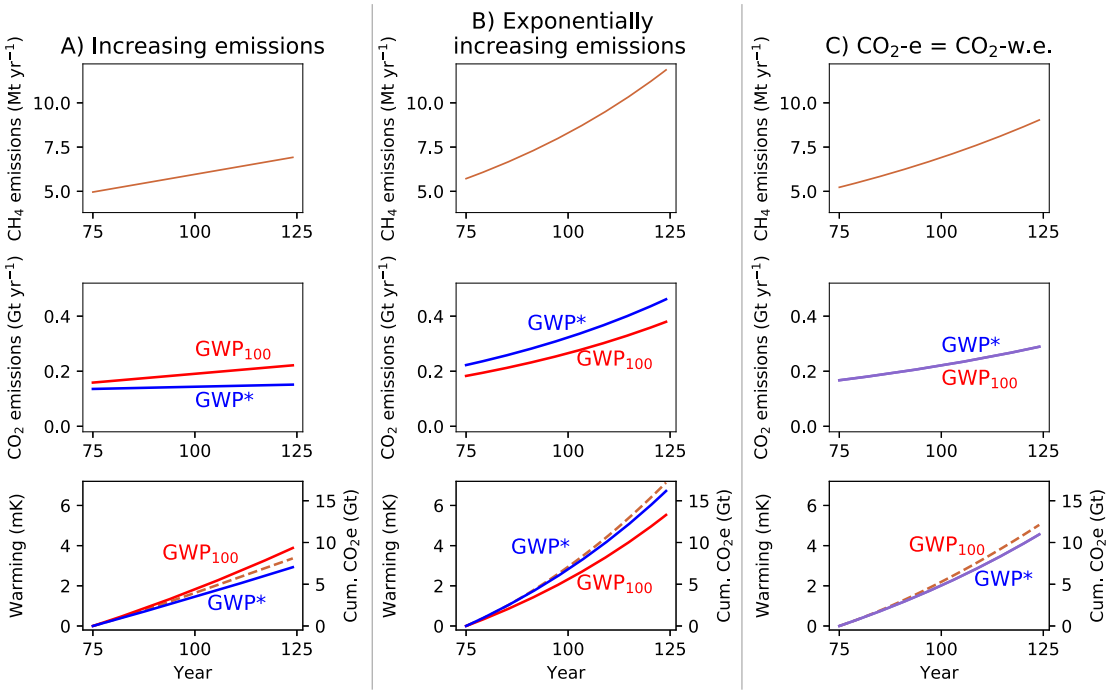


Figure 13 : validation du PRG dans le cas de profils d'émissions croissantes (Lynch et al., 2020)*

Dans le cas d'émissions croissantes, les différences de comportement et de performances relatives du PRG* et du PRG100 sont logiquement moins nettes.

- Dans le cas d'émissions croissantes de manière linéaire, les résultats finaux sont comparables avec, pour le profil testé, une légère sous-estimation du réchauffement pour le PRG* et une surestimation symétrique pour le PRG_{100}.
- Pour des profils exponentiels, les résultats sont légèrement différents : le PRG* rend mieux compte de l'évolution de la température, sous-estimée avec le PRG_{100}.
- La courbe de droite, calculée de manière à ce que les calculs d'émissions du PRG* et PRG_{100}coïncident, conduit à des performances très comparables. Elle donne le profil « limite » de sur/sous estimation (modéré) du PRG_{100}/PRG* : les profils « au-dessus » de la courbe conduiront à une sous-estimation par le PRG_{100}, ceux en-dessous à une légère sous-estimation par le PRG*.

On peut compléter cette validation conduite avec des profils d'émissions théoriques dans l'article de Lynch avec celle conduite dans le rapport du GIEC, qui reprennent les séries d'émissions de ce gaz passées et projettent deux scénarios futurs où les émissions de méthane baissent tardivement et de manière modérée après 2050 [SSP4-6.0, à gauche] ou très rapidement à partir de 2020 [SSP1-2.6] (Forster et al., 2023).

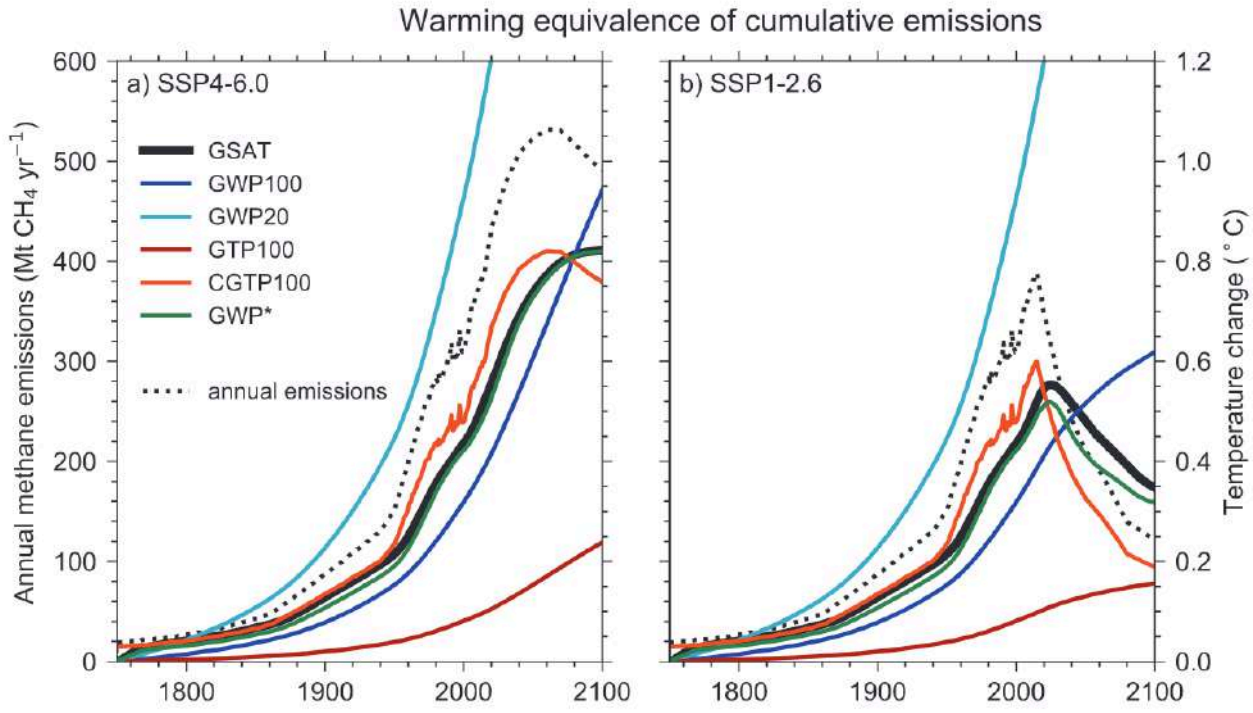


Figure 14 : comparaison des courbes d'impact passée et projetées des émissions de méthane, en référence à la modélisation GSAT en mobilisant différentes métriques, dont le PRG, le PRG100 et le PRG20 Fig.7.22 dans (Forster et al., 2023)*

Dans cette figure, la référence est la courbe noire pleine calculée par Fair V 1.3. Nous ne discutons pas ici le GTP (Global Temperature Potential) ou le CGTP (combined GTP). Les constats :

- Dans le passé :
  - on est bien dans un profil d'émission croissant.
  - Le PRG* rend très bien compte des impacts sur le climat (quasi superposition des courbes verte et noire).
  - Le PRG_{100} a tendance à sous-estimer l'impact tout en restant conforme dans le signal d'ensemble.
  - Le PRG_{20} surestime très rapidement et très largement l'impact des émissions de méthane ; il n'est pas pertinent sur le long terme.
- Dans les scénarios projetés :
  - on passe à des profils d'émission croissant et décroissant .
  - Le PRG* rend très bien compte des impacts sur le climat dans le premier scénario et reste le plus pertinent pour le second, où les baisses d'émissions sont très rapides.
  - Le PRG_{100}ne rend pas compte de l'effet refroidissant des baisses d'émissions.
  - Le PRG_{20} continue de diverger fortement.

Cette supériorité technique du PRG* (avec une autre métrique C-GTP non discutée ici) est reconnue dans le 6ème rapport du GIEC sur la physique du climat (Groupe de travail I) :

> *Les nouvelles métriques des émissions telles que le PRG* et le Global Temperature Change combiné [C-GTP] sont conçues pour relier les taux d'émission de gaz à courte durée de vie à des émissions de CO2, de nature cumulative. Ces métriques sont bien adaptées pour estimer la réponse de la température moyenne du globe [global mean surface air temperature (GSAT)] à partir des émissions agrégées d'une gamme de gaz au fil du temps, ce qui peut être fait en utilisant un coefficient dit « de réponse climatique transitoire » attribué aux émissions cumulées d'équivalent CO2 calculées avec ces métriques. Pour une trajectoire d'émission multigaz donnée, la contribution estimée des émissions au réchauffement de la surface est améliorée soit en utilisant ces nouvelles approches métriques, soit en traitant séparément les chemins d'émission de GES à courte et longue durée de vie, par rapport aux approches qui agrègent les émissions de GES en utilisant des mesures d'émission standard de type PRG100 ou GTP (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023, notre traduction).*

Les soulignés sont de nous.

Pour autant, il est important de souligner que ce même rapport ne conclut pas pour autant à l'usage d'une métrique plutôt qu'une autre. En particulier de recommander absolument l'usage du PRG* par rapport à d'autres. Une section du rapport du GIEC (section 7.6.2 dans le rapport du groupe I) explicite les tenants et aboutissants et pointe les différentes interprétations et approches possibles pour définir les objectifs en termes de ce que signifie le « net zéro » et de comment les métriques influencent la définition de cet objectif. Différentes effets climatiques visés peuvent être définis en fonction d'impacts attendus de trajectoires différenciées de gaz à courte et longue durée de vie.

Plus récemment, le *Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice* de la convention cadre des nations unies sur le changement climatique a pris acte de la nouveauté du débat sur les métriques introduit dans le 6ème rapport du GIEC de 2021 et identifie les enjeux politiques. Il note que dans ce domaine, « *L'évaluation du Groupe de travail I se concentre sur les sciences physiques et ne traite ainsi pas des questions d'équité ou de justice, car celles-ci dépendent davantage de l'utilisation des indicateurs que de la physique qui les sous-tend*[16] » [notre traduction] (Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice, 2023). Ce même document, rendant compte de points de vue divers entre les experts des différents groupes de travail du GIEC et des parties prenantes lors d'un atelier de travail technique rend compte du caractère ouvert des discussions. Il note ainsi une évolution : « *En 2007, le quatrième rapport d'évaluation du GIEC indiquait que le PRG_{100} restait l'indicateur recommandé pour comparer les impacts climatiques futurs des émissions de gaz à longue durée de vie, malgré plusieurs lacunes connues. Cependant, la réunion d'experts du GIEC sur la science des indicateurs alternatifs, qui s'est tenue en 2009, a indiqué, parmi ses principales conclusions et recommandations, que l'efficacité de l'utilisation d'un indicateur donné dépendait de l'objectif politique principal et que le PRG_{100} n'avait pas été conçu dans un but politique particulier. Selon l'objectif ou les objectifs politiques spécifiques, d'autres indicateurs peuvent être préférables*. » (idem).

[16] C'est aussi le cadrage que nous adoptons dans ce document, considérant que la discussion sur les plans éthique, politique et opérationnel est de l'ordre d'un autre document à venir. Sur ces plans, diverses justifications sont présentes qui arrivent à des conclusions contrastées quant aux choix politiques pertinents et font l'objet d'une littérature scientifique abondante dans le champ des politiques du climat et, plus largement, de prise en compte des objectifs de développement durable. Nous ne ferons que les évoquer dans la conclusion du présent rapport.

APPROCHES DE L'IMPACT CLIMATIQUE DE L'ÉVOLUTION DES RUMINANTS ET DE L'AGRICULTURE DANS L'UNION EUROPÉENNE ET EN FRANCE ET CONSÉQUENCES SUR LA HIÉRARCHIE DES ENJEUX

Quels impacts sur le climat de l'évolution des émissions de l'agriculture européenne et française ? Comparaison des conclusions tirées du PRG100, de la modélisation et du PRG*

Les pages qui précèdent montrent l'importance de considérer la dynamique des évolutions de méthane d'un système d'émission pour en comprendre l'impact final sur la température.

Cette section a comme objectif d'appliquer cette analyse aux systèmes d'émission que sont l'agriculture européenne dans son ensemble et le sous-système constitué de l'agriculture française. Rappelons que, comme indiqué dès l'introduction de ce document, nous considérons que c'est bien le système agrialimentaire européen qui nous semble la meilleure échelle d'analyse, permettant de réduire les biais d'interprétation qui résulteraient de transferts d'impacts d'un état qui exporte des émissions vis-à-vis d'un autre qui en importe. Nous indiquons néanmoins les résultats pour la France dans la mesure où ce document s'adresse en premier lieu à un lectorat français dont les repères en matière d'analyse de l'impact climatique de l'agriculture considère d'emblée les émissions nationales.

Un regard sur l'historique des émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture européenne et française

La base de données en ligne PRIMAP-hist (Gütschow et al., 2024) est utilisée ici, dans sa version la plus récente 2.6. C'est une base de données de référence dans les modélisations climatiques : « *l'ensemble de données PRIMAP-hist combine plusieurs ensembles de données publiés pour créer un ensemble complet de trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre pour chaque pays, incluant les gaz du protocole de Kyoto couvrant les années 1750 à 2023 [à date de l'écriture de ce rapport, 2025], et tous les États membres de la CCNUCC (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques), ainsi que la plupart des territoires non membres de la CCNUCC. Les données sous-sectorielles pour l'énergie, les procédés industriels et l'agriculture sont disponibles pour le CO_2, le CH_4 et le N_2O. […].* ».

La version 2.6 comporte une entité EU27BX qui reconstitue de manière agrégée les émissions des 27 états membres de l'Union Européenne actuelle (sans le Royaume-Uni, qui était intégré dans des versions antérieures de PRIMAP-Hist dans l'entité EU28).

Le graphe qui suit indique les séries historiques d'émissions pour les trois principaux gaz à effet de serre de l'agriculture : méthane, protoxyde d'azote et CO_2.

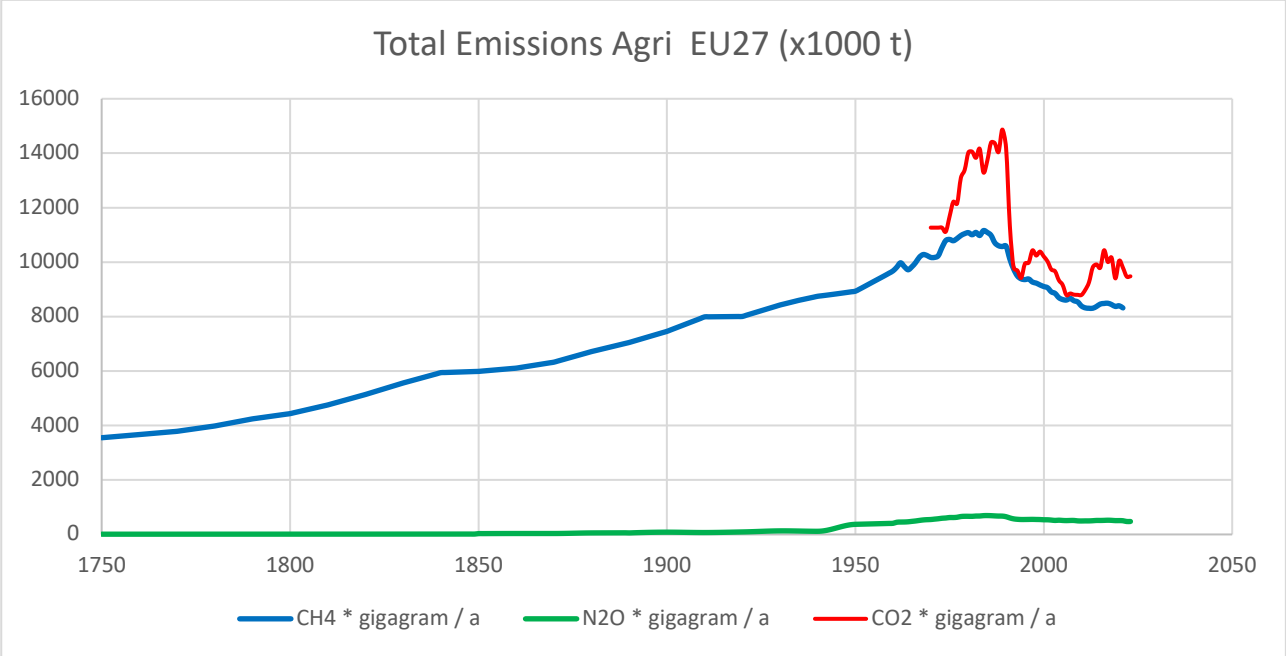


Figure 15 : historique des émissions agricoles de méthane, protoxyde d'azote et dioxyde de carbone pour l'agriculture de l'UE à 27, en milliers de tonnes. Pour les deux premiers gaz, la série est reconstituée depuis 1750 ; pour le CO_2, elle commence en 1970. (source PRIMAP-hist 2.6 ; traitement auteurs)

Ces données brutes sont exprimées en unité de masse (x1000 tonnes) et sont difficilement interprétables en tant que telles – en première lecture trop rapide, on pourra comprendre que les émissions de CO_2 pèsent plus sur le changement climatique que les autres gaz-, rappelant si besoin était l'intérêt d'exprimer en équivalent CO_2 les émissions, qui fait l'objet du graphique suivant. L'incomplétude de la série historique pour le CO_2, qui commence en 1970, n'est pas foncièrement gênante pour l'agriculture, compte-tenu de son rôle très minoritaire pour le climat.

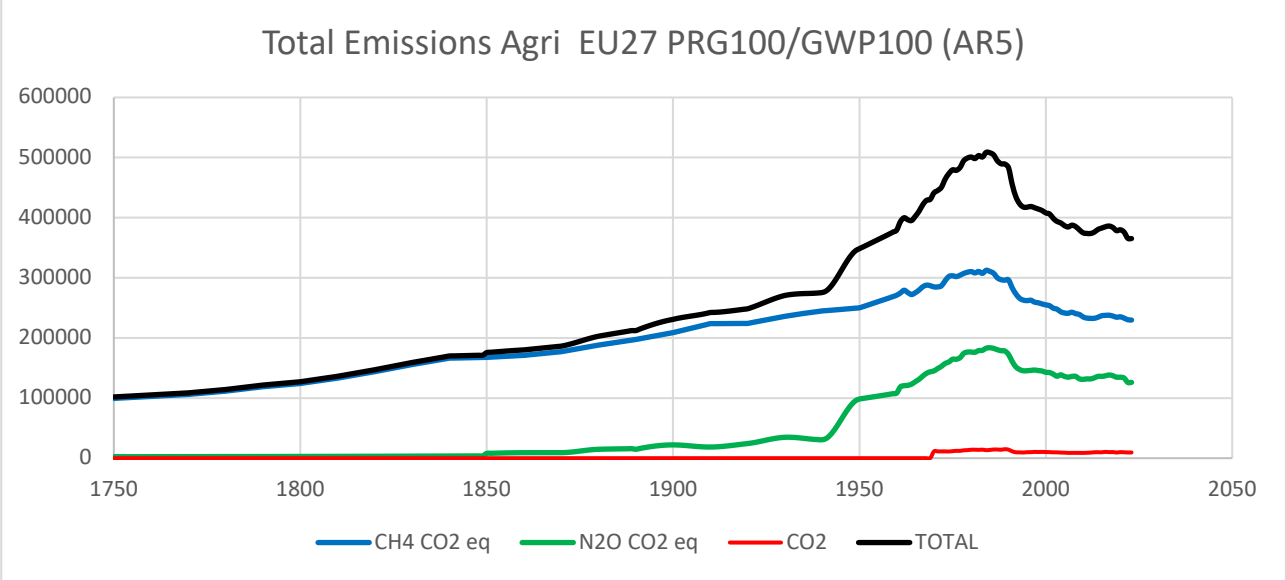


Figure 16 : historique des émissions agricoles de méthane, protoxyde d'azote et dioxyde de carbone pour l'agriculture de l'UE à 27, en équivalent CO_2 – PRG_{100} coefficients AR5. (source PRIMAP-hist 2.6 ; traitement auteurs)

Au-delà de la discussion sur la précision des données historiques, qui dépasse le cadre de ce document, on distinguera quatre grandes périodes :

- La période pré-industrielle, jusqu'à 1850 dans la série, où l'intégralité des émissions anthropiques agricoles comptabilisées est constituée par le méthane des ruminants, avec une pente croissante régulière qui s'explique par la hausse du cheptel de ruminants, elle-même liée à la croissance démographique.
- La période allant de 1850 à 1940, juste avant la révolution agricole industrielle, où les émissions de protoxyde d'azote croissent régulièrement et de manière modérée ; mais la très grande majorité des émissions comptabilisées reste constituée de méthane.
- La période allant de 1940 à 1990, où les émissions de méthane croissent au même rythme que dans les décennies passées, mais où celles de N_2O, liées à l'usage massif des engrais de synthèse, croissent très rapidement.
- Depuis 1990, on note une baisse marquée et régulière des émissions de N_2O (effets de la directive nitrates et plus généralement du progrès agronomique conduisant à une fertilisation plus efficace) et de CH_4 (augmentation de la productivité physique des vaches laitières plus rapide que l'évolution de la demande en lait notamment, induisant une baisse du cheptel).

Les dynamiques sont donc très contrastées et, plus particulièrement, on notera la baisse récente des émissions de méthane. Les émissions de CO_2 sont négligeables pour l'agriculture proprement dite, mais on rappellera que celles liées à la fabrication des engrais et pesticides n'est pas comptabilisée ici. En 2010, on pouvait les estimer à 80 Mteq CO2 qui se rajoutent aux émission directes (Poux & Aubert, 2018).

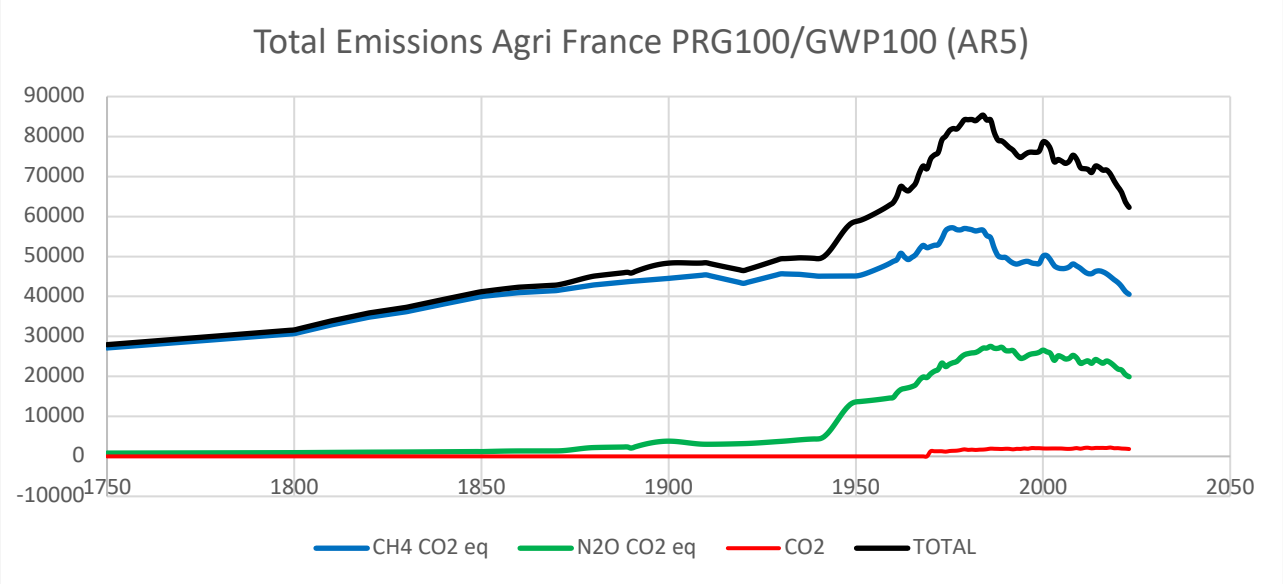


Figure 17 : historique des émissions agricoles de méthane, protoxyde d'azote et dioxyde de carbone pour l'agriculture française, en équivalent CO_2 – PRG_{100} coefficients AR5. (source PRIMAP-hist 2.6 ; traitement auteurs)

Pour la France, la dynamique d'ensemble est similaire à celle de l'UE27 même si dans le détail, les évolutions ne sont pas les mêmes en intensité et rapidité[17]. En particulier, les émissions de méthane sont relativement moins fortes sur le long terme.

Tant pour l'UE27 que pour la France, ces dynamiques correspondent sans ambiguïté à une contribution au réchauffement depuis la période pré-industrielle (avant 1850-1870) jusqu'aux années 1990. Le triplement des émissions de méthane en UE27 (et le doublement en France) a contribué à un réchauffement historique passé constituant un « leg » hérité dans la température atteinte en 1990. Le fait que ce point soit considéré comme étant celui de référence dans les accords de Paris, à partir duquel les efforts de lutte contre le changement climatique doivent être comptabilisés, ne doit

[17] On précisera si besoin était que les données PRIMAP-hist 2.6 coïncident avec celles fournies par le CITEPA à partir de 1990.

pas occulter que cette valeur procède d'une « remise à zéro » des compteurs compréhensible et légitime dans le cadre de ces accords (c'est une des conditions de leur existence), mais non sans passé.

Mais conformément à l'exposé dans les sections qui précèdent, depuis 1990, donc la baisse des émissions de méthane et de protoxyde d'azote doit être prise en compte et considérées de manière différente[18].

Modélisation des impacts sur la température des émissions de l'agriculture de l'Union Européenne à 27 sur trois périodes temporelles

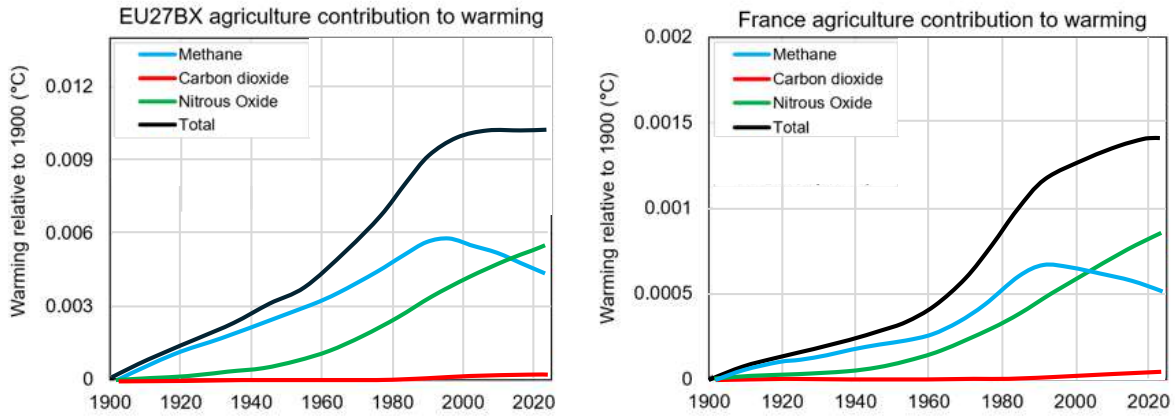
Dans cette section, nous présentons le résultat de modélisations des impacts sur la température des régimes d'émissions agricoles présentés dans la section précédente. Le modèle utilisé est de type Impulse-response linéraire, avec les équations et paramètres documenté dans (Myhre et al., 2013)[19]. L'objectif est de modéliser une contribution au changement de température d'un régime d'émissions sur une période considérée, en partant d'un point 0 au départ de chaque période. Rappelons que ces calculs ne prennent pas en compte le changement d'usage des sols, dont ce n'est pas le champ ; ni par exemple le CO_2 émis pour la fabrication des engrais et des pesticides.

Dans les calculs, le réchauffement additionnel est donc estimé en relatif sur une période donnée sur la base des émissions. Dans les graphiques qui suivent, le point de départ est fixé à 0 pour l'année de référence à laquelle commence la période (par ex., 1900 dans la figure 18).

Nous présentons les résultats pour l'Union Européenne et la France et pour trois périodes de temps :

- La période 1900-présent (2023) : pour rendre compte du changement sur le temps long, induit avant début de la seconde révolution industrielle de l'agriculture en Europe
- La sous-période 1950-présent : correspondant à la seconde révolution industrielle de l'agriculture européenne de l'après-guerre.
- La sous-période 1990-présent : correspondant aux accords de Paris. C'est la période documentée par le Citepa en France.

Même si les deux dernières sous-périodes sont comprises dans la première, les zooms spécifiques facilitent l'interprétation du changement de température relatif sur une période, en changeant le point 0. Les interprétations doivent se faire en ayant ce point à l'esprit.



[18] On soulignera que la référence à l'année 1990 dans les accords de Paris corresponde avec le début de la baisse des émissions agricoles est une coïncidence.

[19] Le code original du modèle a été élaboré par Myles Allen et adapté pour utiliser PRIMAP-hist 2.6 par Vikas Patel et Michelle Cain pour les besoins de la présente étude. Il est disponible sur demande à : myles.allen@ouce.ox.ac.uk

Figure 18 : modélisation de la contribution au réchauffement des émissions de l'agriculture UE27 (à gauche) et française (à droite) depuis 1900, en Δ°C, données PRIMAP-hist 2.6

Sur la longue période étudiée ici, l'agriculture de l'UE27 contribue à un réchauffement de 0,010 °C, avec une stabilisation depuis les années 2000 consécutive à la baisse des émissions de méthane dont l'effet refroidissant (courbe bleue) se trouve compenser le réchauffement dû au protoxyde d'azote (courbe verte) qui continue de réchauffer malgré la baisse des émissions de ce gaz (l'effet est un ralentissement du réchauffement, peu visible sur cette courbe). Mais le message d'ensemble sur la période est un réchauffement dû essentiellement aux émissions de méthane sur la longue période (les ¾ du réchauffement au maximum ; un peu plus de la moitié sur la période récente). La contribution de la France est globalement similaire dans l'ensemble sur la période.

D'autres calculs (non publiés ici), indiquent que ces 0,012 °C de l'agriculture sont à comparer à un réchauffement de 0,17 °C induit par l'ensemble des émissions de l'UE 27 depuis 1850, soit environ 7%.

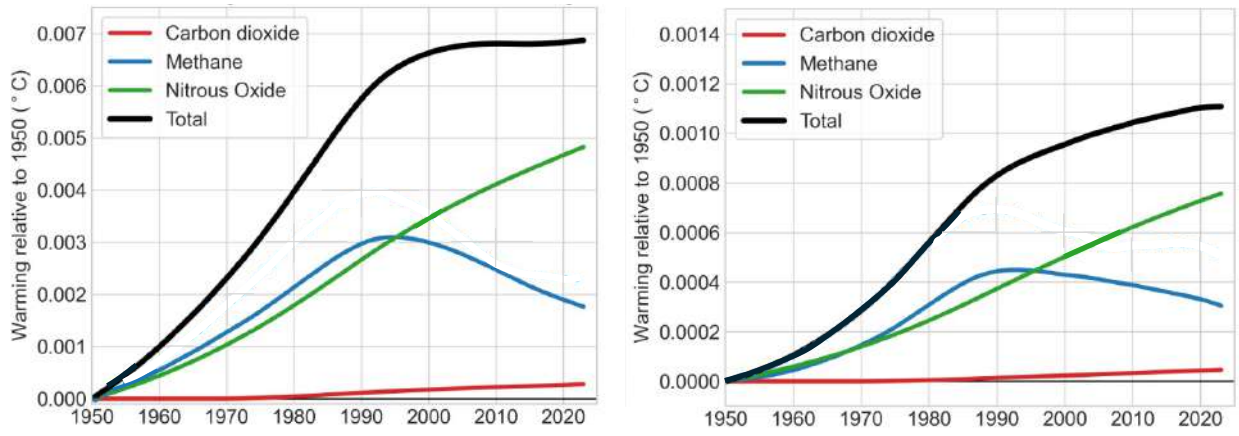


Figure 19 : modélisation de la contribution au réchauffement des émissions de l'agriculture UE27 (à gauche) et française (à droite) depuis 1950, en Δ °C, données PRIMAP-hist 2.6

Le changement de référentiel de temps montre une contribution au réchauffement de 0,007 °C pour l'agriculture de l'UE27 depuis la seconde révolution agricole, soit un peu plus de la moitié depuis la période pré-industrielle de référence. La part contributive du protoxyde d'azote apparaît nettement. On retrouve l'effet refroidissant du méthane. Le réchauffement de l'agriculture représente 5% du réchauffement total de l'UE 27 (0,007 °C/0,12 °C). Là encore la contribution de la France est similaire dans l'ensemble sur la période, avec néanmoins une contribution relative du protoxyde d'azote plus élevée et un effet refroidissant du méthane un peu plus faible.

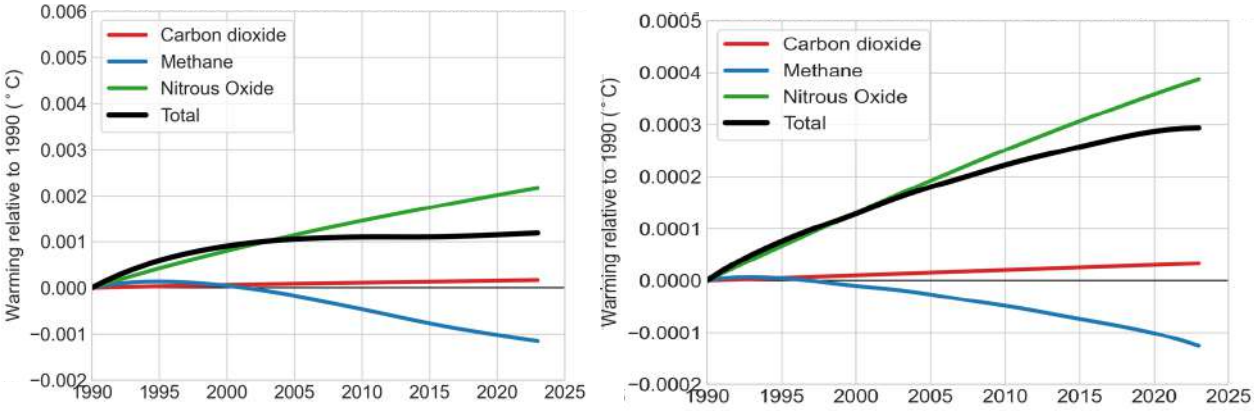


Figure 20 : modélisation de la contribution au réchauffement des émissions de l'agriculture UE27 (à gauche) et française (à droite) depuis 1990, en Δ °C, données PRIMAP-hist 2.6

Le zoom sur la période récente, référence pour les accords de Paris, montre la contribution quasi exclusive des émissions de protoxyde d'azote au réchauffement lié à l'agriculture et l'effet refroidissant du méthane qui compense celui réchauffant du protoxyde d'azote depuis 2000 pour l'UE27, et pas complètement pour la France.

Comparaison modélisation et PRG* - retour sur le PRG_{100}

Les graphes suivant comparent les résultats obtenus par la modélisation, dont les graphes de la section précédente rendent compte avec ceux obtenus en appliquant la formule du PRG*. Pour expliciter ce point à ce stade de l'exposé : conceptuellement, le PRG* pose la question : sur une période de temps donnée, une dynamique d'émission de méthane va conduire à un réchauffement ou un refroidissement que l'on mesure en considérant la quantité de CO2 (mesurée en tonnes) émise en plus (réchauffement) ou soustraite de l'atmosphère (refroidissement) qui aurait conduit au même résultat.

Un des enjeux calculatoire est donc de transformer un équivalent CO_2we (warming equivalent : équivalent réchauffement, à distinguer d'un CO_2éq calculé avec le PRG_{100}) mesuré en tonnes en impact sur la température, mesuré en °C. On mobilise ici un coefficient qui permet d'estimer l'impact réchauffant d'une tonne de carbone nommé « réponse climatique transitoire aux émissions cumulées de carbone » (TCRE). Il varie selon les modèles utilisé et doit être calibré de manière ad hoc (Collins et al., 2014; Stocker & and co-auteurs, 2013) ; dans notre cas nous avons retenu une valeur de 0,4 °C pour 1000 Gt de CO_2., valeur qui permet de réduire l'écart entre les deux modes calculatoires (modèle et PRG*) pour l'UE27. Au-delà de la valeur de ce coefficient qui ne parlera qu'aux modélisateurs, l'intérêt de ce point est de rendre transparent l'ensemble de la mise en œuvre de calcul du PRG* si on veut le comparer à un modèle climatique. Cette étape de passage de CO_2we à la température n'est par contre pas nécessaire si on veut simplement tirer des conclusions similaires à celles fondées sur l'usage d'un PRG_{100}, pour qualifier et analyser des dynamiques d'émissions.

Afin de ne pas multiplier les graphiques, nous indiquons les résultats pour la seule période 1900-2023.

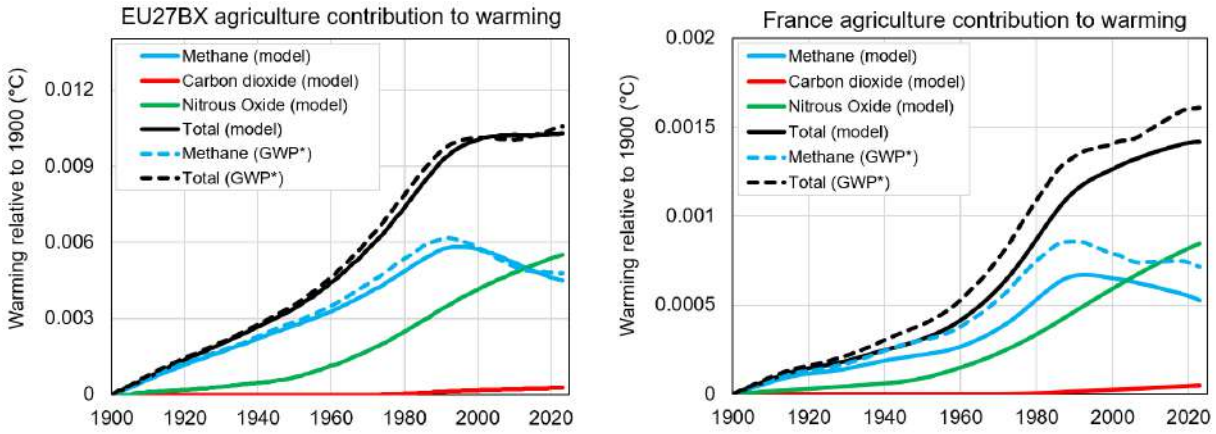


Figure 21 : comparaison des résultats obtenus avec le modèle (cf. fig 18) en traits pleins et le calcul PRG pour le méthane (pointillés) pour la période 1900-2023 – TCRE de 0,4°C pour 1000 Gt de CO2, appliqué aux CO_2-we (voir le texte pour plus de détails)*

Pour l'UE27, les résultats obtenus entre le modèle et le calcul du PRG* sont très proches ; le choix du TCRE a été optimisé pour obtenir ce résultat. Pour la France, l'écart est plus grand, de l'ordre de 10%. Au regard de la forme d'ensemble des courbes du modèle (trait plein) et du PRG* (pointillés) qui sont très proches et qui indiquent que l'écart est purement homothétique, on pourrait obtenir un écart plus faible en jouant sur un TCRE également plus faible.

Nous ne détaillons pas davantage la discussion sur la mise en œuvre du PRG*, dont la plus ou moins grande correspondance avec les résultats obtenus avec un modèle constitue la validation finale. Dans le détail, l'écart entre les deux modes calculatoires dépendra de la variabilité de certaines dynamiques d'émissions à différentes périodes. Les « performances » du PRG* sont meilleures pour des régimes d'émissions réguliers, le calcul amplifiant des variations d'émissions rapides, comparativement au modèle. Les séries temporelles plus courtes sont plus délicates d'interprétation et il faut rendre compte des dynamiques d'émissions de fond, en procédant à un certain lissage des tendances, pour ne pas surinterpréter des micro-variations sur du court terme.

Mais au total, même si un calcul de PRG* peut avoir un écart avec un modèle (qui reste la référence), l'interprétation d'ensemble sur l'impact réchauffant/neutre/refroidissant d'un régime d'émissions reste valide et incomparablement supérieur à celle qu'on fera avec le seul PRG_{100}. En particulier, on ne conclura pas mécaniquement du fait qu'en 2023 les émissions de l'agriculture de l'UE27 en méthane, protoxyde d'azote et dioxyde de carbone en équivalent CO_2 soient respectivement de 63%, 35% et 3%), que leur contribution au réchauffement est dans les mêmes proportions. Ni, plus

fondamentalement, que le maintien à un niveau élevé et très majoritaire des émissions de méthane (les 2/3) continue de contribuer à un réchauffement.

Quelles conséquences de la prise en compte de la durée de vie du méthane dans l'agenda climatique de l'agriculture européenne ?

Un rééquilibrage entre méthane et protoxyde d'azote dans les objectifs de réduction des GES et la communication politique afférente

La prise en compte de la courte durée de vie du méthane, que ce soit via la modélisation ou l'usage du PRG*, change significativement l'analyse des enjeux sur l'agenda climatique de l'agriculture européenne. D'une compréhension où la réduction des émissions de méthane est une priorité absolue de premier rang qui occulte les autres avec le raisonnement en équivalent CO2, la prise en compte de sa courte durée de vie met en avant la contribution éminente des émissions de protoxyde d'azote dans le réchauffement et une contribution actuelle des émissions de méthane à un refroidissement partiel du climat. Autrement dit, au constat que dans la dynamique actuelle des systèmes ruminants en Europe, ces derniers ne contribuent plus au réchauffement, mais à un refroidissement partiel dans un système climatique global qui se réchauffe. Dans cette vision, la réduction des émissions de N_2O devient un objectif majeur, d'importance comparable à celui de réduction des émissions de méthane, qui reste un objectif central que le PRG* n'invisibilise pas.

On fera donc valoir que l'on arrive à la même conclusion en raisonnant en équivalent CO_2 avec le PRG_{100} : quelle que soit la métrique utilisée, il faut baisser les émissions de méthane et celles de N_2O. On soulignera ici qu'une récente publication de (Costa et al., 2021) sur le PRG* conclut que cette métrique n'affaiblit pas l'intérêt de réduire les émissions de méthane, au contraire dans l'optique de la recherche d'un effet refroidissant bien compris grâce à cette métrique. Le PRG* ne changerait rien et de fait, plusieurs rapports et documents cadres de référence en matière de lutte contre le changement climatique en agriculture identifient en outre le protoxyde d'azote comme un objectif important, au même titre que celui de baisser les émissions de méthane, tout en s'appuyant sur une métrique PRG_{100} (Haut Conseil pour le Climat, 2024; Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023). Mais la mobilisation du seul PRG_{100} débouche sur deux problèmes :

- la justification de viser des baisses d'émission de méthane n'est pas précise, ambiguë : ce n'est pas la même chose de viser une baisse des émissions de méthane pour moins réchauffer, comme le laisse comprendre les argumentaires fondés sur le PRG_{100}, que de contribuer à un refroidissement partiel[20] ;
- en cas de baisse (et c'est le cas actuellement et dans les perspectives à court et moyen terme pour l'agriculture européenne), la « charge climatique » globale du méthane se trouve fortement surestimée avec le PRG_{100}. Comme le montre l'encadré 5 (page suivante), le PRG* conduit à comprendre qu'il faut considérablement réduire la contribution totale au réchauffement d'un régime d'émission stable sur plusieurs décennies (divisée par 4), voire à la rendre nulle ou refroidissante en cas de baisse. Le méthane n'est plus nécessairement en lui-même le principal enjeu climatique de l'agriculture.

Cette nouvelle perspective sur le méthane met en relatif la focale sur le protoxyde d'azote et permet en outre de mieux comprendre l'impératif de baisser *rapidement* les émissions de ce gaz dans la mesure où leur impact est comparable à celui du CO_2 du fait d'un comportement cumulatif dans l'atmosphère. Toute molécule de N_2O émise à un moment donné aura un impact réchauffant très fort sur au moins un siècle (Lynch et al., 2021). L'urgence d'intervenir sur ce gaz est aussi forte que pour le méthane alors que beaucoup d'experts n'insistent que sur ce dernier gaz dans la conception des priorités climatiques, en ne considérant pas le N_2O et en surestimant l'impact climatique du méthane (Couturier et al., 2022). Plus globalement, cette prise en compte de l'impact spécifique de chaque gaz conforte l'intérêt de ne pas agréger les objectifs de réduction via un équivalent CO_2 consolidé mais, au contraire, de définir des trajectoires gaz par gaz. Dans

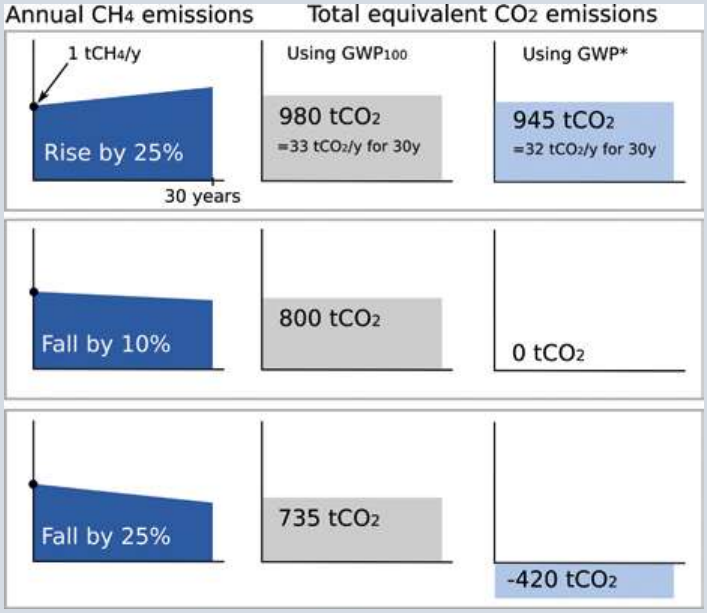
[20] Par exemple, dans un cas (réchauffement), on comprendra qu'il est légitime de taxer les émissions de méthane, dans l'autre (refroidissement), la justification d'une taxe ne tient plus, du moins pas dans le même argumentaire de viser à un ralentissement du réchauffement.

le cas particulier de l'agriculture, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence agronomique des trajectoires conjointes du méthane et du protoxyde d'azote.

Encadré 4 : Neutralité carbone vs. neutralité climat : ce que change l'analyse à l'aide du PRG* pour le méthane d'origine agricole ?

En raisonnant équivalent CO_2 avec le PRG_{100}, la « *neutralité carbone* » appliquée à l'agriculture implique de réduire les émissions de méthane de l'élevage à 0 (comme les autres GES à longue durée de vie, à commencer par le CO_2), modulo ce qu'on peut compenser par les prairies, qui sera toujours insuffisant en ce qui concerne les émissions de méthane.

La prise en compte de la courte durée de vie du méthane permet de comprendre que la « *neutralité climat* » (= pas de hausse de la température) est atteinte pour une baisse de 10% des émissions sur 30 ans alors qu'avec le PRG_{100}, une baisse de 10% sur 30 ans ne baisse l'impact climatique « que » de 10%. Au-delà de ce rythme, on a un effet refroidissant équivalent au fait de *retirer* du CO_2 de l'atmosphère, soit une émission négative.



(Cain et al., 2019b)

Les efforts de réduction nécessaires sont incomparables. Ce point est fondamental pour comprendre qu'en cas de stabilité des émissions du système agricole européen, et a fortiori de baisse comme c'est le cas actuellement, l'usage du seul PRG_{100} conduit à considérablement surestimer la « charge climat » des ruminants liée aux émissions de méthane.

Rappelons qu'en symétrique, toute trajectoire d'émission à la hausse – passée, présente ou future - conduit à un réchauffement. Rappelons également que la dynamique d'émissions agricoles au niveau européen est différente de celle au nivea mondial et qu'à ce dernier niveau, la diminution totale des émissions de méthane nécessaire est typiquement d'un facteur 2 dans les trajectoires limitant le réchauffement sous 2°C ou proche de 1.5°C.

Par ailleurs, on peut aussi faire valoir une idée importante développée par (Lynch et al., 2021) relativement à la communication à destination de, et venant de trois catégories d'acteurs clés : les acteurs politiques, les parties prenantes (ONG et experts) et le grand public dans son ensemble, y compris les agriculteurs. Une comptabilité sur Google[21] indique que la recherche « agriculture méthane » donne 52 millions d'occurrences et celle « agriculture protoxyde d'azote » 120 000, soit un rapport de 430 pour 1. Si l'on restreint à Google Scholar, plus documenté sur le plan scientifique, ce sont respectivement 35 000 et 4 600 occurrences, soit un rapport de 7,5 pour 1. Ces indicateurs éclairent bien l'état de la communication grand public et professionnelle sur ce thème et l'enjeu qu'il y a à rendre plus visible la contribution éminente du protoxyde d'azote dans le réchauffement causé par l'agriculture et l'urgence d'en réduire les émissions. C'est une chose que les experts connaissent aussi les impacts du protoxyde d'azote sur le climat, c'en est une autre que

[21] Recherches effectuée sur Google en France le 5/12/2024.

cet objectif soit compris et repris dans le portage politique sur le terrain et dans les institutions de recherche et développement.

Un nouveau regard sur les prairies permanentes

Le rôle de stock de carbone des prairies permanentes est largement reconnu, avec des capacités de stockage additionnel différentes au cours du temps selon les contextes (Bai & Cotrufo, 2022) (Jordon et al., 2024). Un débat récurrent est la capacité à ce que ce stockage compense les émissions de GES par les ruminants, avec des valeurs qui diffèrent selon les systèmes de production, les contextes pédoclimatiques et les modes de gestion (Dollé et al., 2011; Soussana, 2013). Dans tous les cas, les prairies ne compensent qu'une partie des émissions calculées avec le PRG_{100}, 30% maximum en élevage laitier et 50% pour les élevages viande (Gac et al., 2020). Ces valeurs sont de plus soumises à révision si la capacité de stockage annuelle décroit voire, à l'extrême, pourrait devenir négative (Jordon et al., 2024).

Une des conséquences de ce raisonnement de « compensation » en équivalent CO_2 est de considérer que, comme cette compensation n'est que partielle, la perte d'un système « ruminants/prairies » conduirait à un gain climatique net, quel que soit l'usage du sol alternatif. Or la prise en compte de la courte durée de vie du méthane change là aussi la compréhension de l'enjeu : il ne s'agit pas de compenser via la recherche d'un stockage additionnel – qui sera toujours bienvenu s'il est possible - un réchauffement auquel la dynamique des ruminants en Europe ne contribue plus aujourd'hui, mais fondamentalement de conserver des stocks déjà existants de CO_2 et d'azote dans les prairies, et dont l'existence même est associée à la présence de ruminants. En termes de communication et de compréhension des enjeux, il n'y a pas à rechercher un compromis ambigu pour le climat entre l'impact positif pour le climat des prairies – sans oublier leur contribution à la conservation de la biodiversité - et un supposé impact négatif lié à la nature émissive des ruminants, tant que les émissions de méthane de ces derniers ne croissent pas.

Des options agri-climatiques à tester de manière globale

Au total, la courte durée de vie du méthane redistribue la compréhension des enjeux et des priorités climatiques associées à l'agriculture en général et à la place des ruminants dans l'agenda climatique. Un point important à noter dans cette perspective sont les liens fonctionnels entre ces trois composantes clés dans l'équation climatique de l'agriculture européenne (Poux & Aubert, 2022), à considérer en dynamique :

- L'évolution des émissions de méthane par les ruminants ;
- La part des prairies et les changements d'usage des sols ;
- Les émissions de protoxyde d'azote.

Les deux premiers termes (ruminants et prairies) sont potentiellement antagonistes avec le dernier (émissions N2O) dans la mesure où les systèmes ruminants herbagers sont ceux susceptibles de maximiser les entrées d'azote symbiotique dans les agrosystèmes, en substitution à l'azote minéral dont le coefficient d'émissions atmosphérique est plus élevé que celui d'origine organique issu des systèmes ruminants. En réciproque, un système agricole sans ruminants conduit à une baisse des émissions de méthane mais augmente le nécessaire recours aux engrais azotés de synthèse, et donc l'émission accrue de protoxyde d'azote. Dans cette recherche d'équilibre, il a pu être modélisé que le meilleur scénario en termes d'émissions de GES, en utilisant le PRG_{100}, n'est pas nécessairement celui où la part des ruminants est la plus faible (van Selm et al., 2022).

Il faut donc considérer les interactions fonctionnelles entre les différentes composantes du système agricole et construire des options cohérentes sur le plan agronomique, en fonction d'hypothèses sur l'intensité globale de ce système en termes d'élevage de ruminants et de mobilisation d'azote minéral et organique. Il faut aussi considérer un potentiel arbitrage entre la recherche d'effets rapide à court terme (via la réduction rapide des émissions de méthane par exemple) et ceux à plus long terme (par le stockage d'azote dans les prairies et la réduction des émissions de N_2O).

L'explicitation des différentes options et leur comparaison sous l'angle de leur impact potentiel sur le climat dépasse le cadre de ce rapport. Mais il nous semble important de souligner combien la prise en compte de la courte durée de vie du méthane, en changeant la compréhension des dynamiques temporelles et l'impact des différentes composantes du système agricole, permet d'envisager un nombre de leviers plus large que la seule maximisation des réductions des émissions de méthane, qui reste nécessaire mais à pondérer dans un cadre plus large de recherche d'équilibres agronomiques et climatiques.

Et au-delà de la seule question climatique, nous rejoignons encore une fois les conclusions de (Lynch et al., 2021) sur ce que change la prise en compte de la courte durée de vie du méthane à travers le PRG* : la possibilité accrue d'ouvrir un débat plus large sur l'évaluation intégrée des options de réduction des émissions avec des considérants sur les changements d'usage des terres, les enjeux de gestion de la biomasse, d'alimentation et de développement socio-économique et de biodiversité. L'idée n'est pas d'abandonner une ambition dans la lutte contre le changement climatique mais de l'inscrire dans un agenda politique plus large, visant à mieux intégrer les différents enjeux d'usage des sols.

« Enfin, nous devons également noter brièvement l'importance de considérations plus larges sur l'utilisation des terres liées à la réduction des émissions agricoles. Bien qu'un traitement complet de ce sujet dépasse le cadre de ce document, l'utilisation des terres à des fins climatiques telles que la séquestration du carbone ou la biomasse pour l'énergie est souvent mise en avant comme étant essentielle pour des voies d'atténuation ambitieuses (GIEC, sous presse). Reconnaissant que les terres agricoles ne sont pas utilisées principalement à ces fins, un « coût d'opportunité du carbone » est de plus en plus cité pour la production agricole (Searchinger et al., 2018). Les interventions visant à réduire les émissions agricoles peuvent donc également être liées aux efforts d'atténuation basés sur l'utilisation des terres (ou vice-versa). Une plus grande attention doit être accordée aux facteurs et aux implications des différentes utilisations des terres envisagées, car c'est par le biais de différentes gestions des terres que les stratégies de réduction des émissions agricoles peuvent renforcer ou entrer en conflit avec d'autres objectifs de développement durable (Arneth et al., sous presse). » (Lynch et al., 2021)

CONCLUSION : ENJEUX DE MEILLEURE PRISE EN COMPTE DE LA COURTE DURÉE DE VIE DU MÉTHANE : LES ÉCHELLES DE CLÔTURE SYSTÉMIQUE

À l'issue de cette analyse sur la courte durée du vie du méthane et de sa prise en compte à travers la métrique PRG* une question d'ensemble demeure : dans la mesure où le changement climatique est une question globale, quelle est la signification de désagréger des émissions sectorielles par grand ensemble géopolitique ? Autrement dit, chaque molécule de méthane réchauffant de manière identique, qu'elle soit émise par un bovin européen appartenant à un cheptel en décroissance ou par une plate-forme pétrolière d'un pays qui augmente ses émissions énergétiques, est-il pertinent de les distinguer selon leur origine ? L'objectif partagé étant bien la réduction des émissions de méthane à l'échelle mondiale, chaque molécule gagnée compte de manière identique.

Sur ce point, deux interprétations peuvent être défendues. La première est celle de la fongibilité globale de toutes les émissions de méthane anthropique, quelle qu'en soit leur origine géographique ou sectorielle. C'est celle exposée ci-dessus, qui repose sur une vision « vue de l'atmosphère » considérée comme le récepteur final de l'ensemble indifférencié des émissions du globe. Dans cette optique, l'intérêt de mobiliser le PRG* n'apparaît pas d'emblée. D'une part, on est loin d'une stabilisation voire d'une baisse des émissions de méthane où l'intérêt du PRG* dans la bonne représentation des impacts sur le climat est la plus nette. Au niveau global, l'approximation par le PRG_{100} conduit à un résultat proche de la réalité en termes de réchauffement. Par ailleurs, le coût de communication politique de changement de métrique ne semble pas justifié au regard de ses gains en termes de rigueur scientifique.

Mais une autre vision est également défendable, qui part des émissions et du constat que les efforts de réduction doivent être répartis selon des critères de justice et d'efficacité quant à la baisse des températures et que cette répartition implique une différentiation sectorielle et géographique. C'est celle retenue dans les accords de Paris (Godard, 2015). Quand on écrit que « l'élevage de ruminants d'un pays émet tant de tonnes de méthane et qu'il faut les réduire de tant de % », on est bien dans cet exercice de ce qu'on peut appeler la clôture systémique des émissions pour leur donner une prise politique. Et c'est bien dans cette optique différenciée que le PRG* prend son sens, pour affiner la compréhension des efforts de réduction par entité politique compétente (les États et les parties), à commencer par une meilleure prise en compte des effets à court et long terme à attendre de la réduction de gaz aux comportements temporels différents, notamment pour éviter des « compensations » mal pensées entre parties, entre notamment refroidissement à court terme vs. réchauffement à long terme. Une des recommandation majeure qui découle de la mobilisation du PRG* est de mieux distinguer les budgets des différents gaz à effet de serre selon leur durée de vie dans la fixation des objectifs.

Notre propos dans cette conclusion n'est pas de trancher ce débat, mais d'en exposer les termes. Il n'est sans doute pas complètement décidable du seul point de vue scientifique de la physique du climat, et c'est la raison pour laquelle le GIEC ne recommande aucune des deux métriques – ni, et il est important de le noter, ne disqualifie celle du PRG* dont la meilleure capacité à rendre compte de l'impact climatique des émissions de méthane est reconnue dans le 6ème rapport. Ce même rapport indique ainsi que le choix de ces métriques sont bien d'ordre politique, en fonction des objectifs et des enjeux qu'il s'agit d'éclairer.

« À la suite du 5ème rapport du Giec, ce rapport [de 2019] *ne recommande pas de métrique, car la pertinence du choix dépend des objectifs pour lesquels les gaz ou les agents de forçage sont comparés. Les métriques peuvent faciliter la comparaison des effets des émissions, à l'appui des objectifs politiques. Elles ne définissent pas* [en elles-mêmes] *les objectifs ou les cibles politiques, mais peuvent contribuer à l'évaluation et à la mise en œuvre de choix dans le cadre de politiques à plusieurs composantes (par exemple, elles peuvent aider à établir les priorités en matière de réduction des émissions). Le choix de la mesure dépendra des aspects du changement climatique qui sont les plus importants pour une application ou une partie prenante particulière et des horizons temporels. Des objectifs de politique climatique différents aux niveaux international et national peuvent conduire à des conclusions différentes quant à la mesure des émissions la plus appropriée (Myhre et al., 2013b).* (Forster et al., 2023)

Ces considérants sont ici exposés essentiellement dans le seul champ de l'atténuation du changement climatique, mais dans la continuation de (Lynch et al., 2021) et (Arneth et al., 2022), nous défendons l'idée qu'il faut en outre intégrer d'autres objectifs liés à l'usage des sols et de l'ensemble des objectifs du développement durable, en particulier dans le secteur agricole, ce à quoi une approche différenciée mobilisant le PRG* contribue.

Au-delà de cette justification de principe d'une approche différenciée par secteur et par entité géopolitique sans laquelle l'usage du PRG* perd de sa pertinence opérationnelle – sinon scientifique – il est clair que sa mobilisation soulève d'autres questions politiques relatives à la justice climatique, et notamment une « amnésie » correspondant à une prime donnée aux gros pays historiquement émetteurs de méthane qui réduisent leurs émissions récemment – comme c'est le cas de l'Union Européenne, comme nous l'avons vu. Et en réciproque, une évaluation très sévère de l'impact de pays faiblement émetteurs mais dont les émissions croissent pour des raisons de développement économique, comme ceux de l'Afrique sub-saharienne par exemple. Ces questions sont légitimes mais peuvent aussi être resituées dans un cadre de discussion politique et éthique plus large intégrant une analyse serrée des temporalités invoquées, des arbitrages sectoriels (agriculture vs. énergie fossile par exemple) et des enjeux socio-économiques, culturels et écologiques situés. On les inscrira plus généralement dans le cadre des accords de Paris qui répartissent les efforts de réduction entre parties et sur la base de d'une année de référence communément définie (1990), à partir de laquelle les efforts de réduction des émissions doivent être comptabilisées.

Allen, M. R., Fuglestvedt, J. S., Shine, K. P., Reisinger, A., Pierrehumbert, R. T., & Forster, P. M. (2016). New use of global warming potentials to compare cumulative and short-lived climate pollutants. *Nature Climate Change*, *6*(8), 773-776. https://doi.org/10.1038/nclimate2998

Allen, M., Shine, K., Fuglestvedt, J., Millar, R., Cain, M., Frame, D., & Macey, A. (2018). A solution to the misrepresentations of CO2-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation. *npj Climate and Atmospheric Science*, *1*. https://doi.org/10.1038/s41612-018-0026-8

Arneth, A., Denton, F., Agus, F., & et alii. (2022). *Climate Change and Land : IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (1re éd.). IPCC, Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157988

Bai, Y., & Cotrufo, M. F. (2022). Grassland soil carbon sequestration : Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, *377*(6606), 603-608. https://doi.org/10.1126/science.abo2380

Bellasen, V. (2023, novembre 15). *Affichage environnemental : Bio ou pas, comment évaluer l'impact écologique des aliments ?* The Conversation. http://theconversation.com/affichage-environnemental-bio-ou-pas-comment-evaluer-limpact-ecologique-des-aliments-216505

Cain, M., Lynch, J., Allen, M. R., Fuglestvedt, J. S., Frame, D. J., & Macey, A. H. (2019a). Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *Npj Climate and Atmospheric Science*, *2*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4

Cain, M., Lynch, J., Allen, M. R., Fuglestvedt, J. S., Frame, D. J., & Macey, A. H. (2019b). Net zero for agriculture—Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *Npj Climate and Atmospheric Science*, *2*(1), 29. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0086-4

Campbell, B., Beare, D., Bennett, E., Hall-Spencer, J., Ingram, J., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J., Shindell, D., Campbell, B. M., Beare, D., Bennett, E., Hall-Spencer, J., Ingram, J., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J., & Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *ECOLOGY AND SOCIETY*, *22*, 8. https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408

Citepa. (2024). *Rapport Secten – Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023.* (p. 561). Citepa.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A. J., & Wehner, M. (2014). Long-term Climate Change : Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (1re éd., p. 1029-1136). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024

Costa, C., Wironen, M., Racette, K., & Wollenberg, E. K. (2021). *Global Warming Potential* (GWP*) : Understanding the implications for mitigating methane emissions in agriculture*. https://hdl.handle.net/10568/114632

Couturier, C., de Solagro, D., & Demarcq, F. (2022). *L'urgence de réduire les émissions de méthane* (Décryptage). La fabrique écologique.

Dollé, J. B., Agabriel, J., Peyraud, J. L., Faverdin, P., Manneville, V., Raison, C., Gac, A., & Gall, A. L. (2011). Les gaz à effet de serre en élevage bovin : Évaluation et leviers d'action. *INRAE Productions Animales*, *24*(5), Article 5. https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.5.3275

Ehhalt, D., Prather, M., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P., Wang, M., Berntsen, T., Bey, I., Brasseur, G., Buja, L., Collins, W. J. J., Daniel, J., Demore, W. B. B., … Mcfarland, M. (2001). Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. In *Climate change 2001 : The scientific basis, Intergovernmental panel on climate change*. https://hal.science/hal-03333922

Forster, P., Storelvmo, T., Armous, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 923-1054). Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Fuglestvedt, J. S. (2003). Metrics of Climate Change : Assessing Radiative Forcing and Emission Indices. *Climatic Change*, *58*(3), 267-331. https://doi.org/10.1023/A:1023905326842

Gac, A., Dollé, J.-B., Gall, A. L., Klumpp, K., Tallec, T., Mousset, J., Eglin, T., & Bispo, A. (2020). *Le stockage de carbone par les prairies* (L'essentiel). Institut de l'élevage, INRA.

Godard, O. (2015). *La justice climatique mondiale*. la Découverte.

Gütschow, J., Busch, D., & Pflüger, M. (2024). *The PRIMAP-hist national historical emissions time series (1750-2023) v2.6* (Version 2.6) [Jeu de données]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.13752654

Harrison, P. A., McElwee, P., & van Huysen, T. L. (eds). (2024). *Thematic Assessment Report on the Interlinkages among Biodiversity, Water, Food and Health of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES.

Haut Conseil pour le Climat. (2024). *Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste* (p. 168).

Hodnebrog, Ø., Aamaas, B., Fuglestvedt, J. S., Marston, G., Myhre, G., Nielsen, C. J., Sandstad, M., Shine, K. P., & Wallington, T. J. (2020). Updated Global Warming Potentials and Radiative Efficiencies of Halocarbons and Other Weak Atmospheric Absorbers. *Reviews of Geophysics*, *58*(3), e2019RG000691. https://doi.org/10.1029/2019RG000691

Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1re éd.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Éd.). (2023). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 3-32). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001

IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories—IPCC*. https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

Jackson, R. B., Saunois, M., Bousquet, P., Canadell, J. G., Poulter, B., Stavert, A. R., Bergamaschi, P., Niwa, Y., Segers, A., & Tsuruta, A. (2020). Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources. *Environmental Research Letters*, *15*(7), 071002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2

Jordon, M. W., Buffet, J.-C., Dungait, J. A. J., Galdos, M. V., Garnett, T., Lee, M. R. F., Lynch, J., Röös, E., Searchinger, T. D., Smith, P., & Godfray, H. C. J. (2024). A restatement of the natural science evidence base concerning grassland management, grazing livestock and soil carbon storage. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *291*(2015), 20232669. https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2669

Laponche, B. (2020). *Une application du PRG du méthane à un horizon donné TH*.

Laponche, B. (2024, décembre 13). *Une application du potentiel de réchauffement du méthane à un horizon donné TH*. Global Chance. https://global-chance.org/Une-application-du-potentiel-de-rechauffement-du-methane-a-un-horizon-donne-TH

Lynch, J. (2019). *Agricultural methane and its role as a greenhouse gas*. Food Climate Research Network. https://doi.org/10.56661/0f7f7b1e

Lynch, J., Cain, M., Frame, D., & Pierrehumbert, R. (2021). Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO2-Emitting Sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *4*, 518039. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.518039

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 long-lived climate pollutants. *Environmental Research Letters*, *15*(4), 044023. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7e

Methane emissions in livestock and rice systems. (2023). FAO. https://doi.org/10.4060/cc7607en

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Zhang, H., Aamaas, B., Boucher, O., Dalsøren, S. B., Daniel, J. S., Forster, P., … Shine, K. (2013). Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I. In *Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]* (Cambridge University Press).

Nisbet, E. G., Manning, M. R., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Lan, X., Röckmann, T., Denier Van Der Gon, H. A. C., Schmitt, J., Palmer, P. I., Dyonisius, M. N., Oh, Y., Fisher, R. E., Lowry, D., France, J. L., White, J. W. C., Brailsford, G., & Bromley, T. (2023). Atmospheric Methane : Comparison Between Methane's Record in 2006–2022 and During Glacial Terminations. *Global Biogeochemical Cycles*, *37*(8), e2023GB007875. https://doi.org/10.1029/2023GB007875

Oppermann, R., Beaufoy, G., & Jones, G. (Éds.). (2012). *High nature value farming in Europe*. Verlag Regionalkultur.

Pearce, E. A., Mazier, F., Normand, S., Fyfe, R., Andrieu, V., Bakels, C., Balwierz, Z., Bińka, K., Boreham, S., Borisova, O. K., Brostrom, A., De Beaulieu, J.-L., Gao, C., González-Sampériz, P., Granoszewski, W., Hrynowiecka, A., Kołaczek, P., Kuneš, P., Magri, D., … Svenning, J.-C. (2023). Substantial light woodland and open vegetation characterized the temperate forest biome before *Homo sapiens*. *Science Advances*, *9*(45), eadi9135. https://doi.org/10.1126/sciadv.adi9135

Poux, X., & Aubert, P. (2022). Putting permanent grassland at the heart of a European agroecological transition : Findings and questions arising from the 'Ten Years for Agroecology' (TYFA) scenario. *Grass and Forage Science*, gfs.12597. https://doi.org/10.1111/gfs.12597

Poux, X., & Aubert, P.-M. (2018). *Une Europe agroécologique en 2050 : Une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine* (Study N°09/18, p. 78). IDDRI - AScA.

Réseau Action Climat. (2017, mai 10). *Méthane et changements climatiques : Un danger négligé qui s'accroît*. Réseau Action Climat. https://reseauactionclimat.org/methane-changement-climatique-danger-neglige/

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., … Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, *461*(7263), 472-475. https://doi.org/10.1038/461472a

Saunois, M., Martinez, A., Poulter, B., Zhang, Z., Raymond, P., Regnier, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Patra, P. K., Bousquet, P., Ciais, P., Dlugokencky, E. J., Lan, X., Allen, G. H., Bastviken, D., Beerling, D. J., Belikov, D. A., Blake, D. R., Castaldi, S., … Zhuang, Q. (2024). Global Methane Budget 2000–2020. *Earth System Science Data Discussions*, 1-147. https://doi.org/10.5194/essd-2024-115

Secrétariat Général à la Planification Écologique. (2023). *La planification écologique dans l'agriculture* (p. 19). Premier ministre. https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/06/37fb0deba7e906c2ced7f4628c067eff5c403ff8.pdf

Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R. J., Passerello, G. A., & Regayre, L. A. (2018). FAIR v1.3 : A simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geoscientific Model Development*, *11*(6), 2273-2297. https://doi.org/10.5194/gmd-11-2273-2018

Smith, M. A., Cain, M., & Allen, M. R. (2021). Further improvement of warming-equivalent emissions calculation. *Npj Climate and Atmospheric Science*, *4*(1), 19. https://doi.org/10.1038/s41612-021-00169-8

Solomon, S., Daniel, J. S., Sanford, T. J., Murphy, D. M., Plattner, G.-K., Knutti, R., & Friedlingstein, P. (2010). Persistence of climate changes due to a range of greenhouse gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*(43), 18354-18359. https://doi.org/10.1073/pnas.1006282107

Soussana, J.-F. (2013). *Prairies et changement climatique*. 171-180.

Stocker, T. F., & and Coauthors. (2013). Technical Summary. In *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis* (1re éd., p. 31-116). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.005

Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice. (2023). *In-session technical workshop on findings on emission metrics contained in the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Fifty-eight session; p. 13). United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/sbsta2023_inf02.pdf

Tian, H., Xu, R., Canadell, J., Thompson, R., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., Davidson, E., Ciais, P., Jackson, R., Janssens-Maenhout, G., Prather, M., Regnier, P., Pan, N., Pan, S., Peters, G., Shi, H., Tubiello, F., Zaehle, S., Zhou, F., & Yao, Y. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, *586*, 248-256. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0

van Selm, B., Frehner, A., de Boer, I. J. M., van Hal, O., Hijbeek, R., van Ittersum, M. K., Talsma, E. F., Lesschen, J. P., Hendriks, C. M. J., Herrero, M., & van Zanten, H. H. E. (2022). Circularity in animal production requires a change in the EAT-Lancet diet in Europe. *Nature Food*, *3*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00425-3

ANNEXE : LISTE DES PERSONNES INTERROGÉES ET ATELIERS D'ÉCHANGES AUTOUR DU PRG*

Personnes interrogées

Les entretiens portaient sur la connaissance préalable du contenu technique du PRG*, sur sa perception *a priori*, et sur l'identification des enjeux associés à son éventuel usage.

- Pierre-Marie Aubert, IDDRI
- Aurélie Catallo, IDDRI
- Arnaud Hélias, INRAE
- Benoît Rouillé, Idele
- Jean-Louis Peyraud, INRAE
- Marie-Hélène Schwoob, CGDD
- Jean-François Soussana, Haut Conseil pour le Climat
- Louis-Georges Soler, INRAE

Séminaires de mise en discussion

Les séminaires ont été l'occasion d'avoir des retours sur la compréhension des enjeux associés au PRG* et sur les perceptions.

- Iddri (mars 2025)
- UMR Métis (mars 2025)

Un séminaire plus ancien avait déjà permis d'aborder ces questions :

- Réseau Transitions (juin 2023)