

Aérosols et emballement climatique. Penser l'innovation élargie

Aerosols and runaway climate change. Broadening the Scope of Innovation

Marc Delepouve¹, Bertrand Bocquet²

¹ Laboratoire d'Histoire des Technosciences en Société, EA 3716, Cnam, Université de Lille, Paris, France, marc.delepouve@univ-lille.fr

² Laboratoire d'Histoire des Technosciences en Société, EA 3716, Cnam, Université de Lille, Paris, France, bertrand.bocquet@univ-lille.fr

RÉSUMÉ. La prise en compte des données temporelles dans la réduction des émissions anthropiques de gaz dans l'atmosphère accentue les conséquences imprévisibles du changement climatique. En effet, les énergies fossiles émettent différents gaz dont le CO₂ et le SO₂. Ce dernier refroidit le climat, mais les durées de vie de ces deux gaz sont très différentes : plus d'un siècle pour le premier, moins de deux semaines pour le second. La défossilisation de l'énergie rend plus probable un emballement du réchauffement. La réduction au plus vite des émissions anthropiques de méthane (CH₄), appuyant la thèse de la décarbonation dans toute sa diversité, est une solution. Elle requiert des innovations techniques, institutionnelles et sociétales, lesquelles nécessitent une appropriation citoyenne. L'apport de la démocratie technique par ses forums hybrides prolongés par l'approche en recherche action participative liant recherches de plein air et recherches confinées peut être déterminant.

ABSTRACT. Considering temporal data in reducing anthropogenic gas emissions into the atmosphere amplifies the unpredictable risks of climate change. Fossil fuel combustion emits various gases such as CO₂, and SO₂, which have contrasting climate impacts and atmospheric lifespans- over a century for CO₂ and less than two weeks for SO₂. The defossilization of energy's transition, away from fossil fuels, may accelerate global warming risks due to the loss of SO₂'s cooling effect. A strategic focus on rapidly mitigating anthropogenic methane (CH₄) emissions aligns with a diversified decarbonization paradigm and offers a feasible pathway. Achieving this requires a nexus of technological, institutional, and societal innovations that depend on public engagement. The integration of technical democracy, via hybrid forums, and participatory action research combining field-based and controlled environments, could provide the institutional framework needed to navigate these complex transitions effectively.

MOTS-CLÉS. changement climatique, décarbonation, gaz à effet de serre, démocratie technique, recherche action participative.

KEYWORDS. climate change, decarbonation, greenhouse gases, technical democracy, participatory action research.

1. Introduction

Les deux principaux gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère terrestre par l'activité humaine sont le dioxyde de carbone, CO₂, puis le méthane, CH₄. Le poids de ce dernier dans le surplus actuel d'effet de serre, i.e. la différence entre l'effet de serre actuel et l'effet de serre de la période préindustrielle¹, vaut environ 55 % du poids du CO₂ [DEL, 2023, p.211-212]. Le troisième est le protoxyde d'azote, N₂O. Le poids de ce dernier dans le surplus actuel d'effet de serre n'atteint qu'environ un dixième du poids du CO₂² et environ un cinquième de celui du CH₄. Enfin, la réunion des autres GES d'origine anthropique (gaz halogénés et monoxyde de carbone) pèse moins que le double du seul N₂O³. Si bien que l'abus de langage courant qui consiste à utiliser l'expression

¹ Nous entendons par période préindustrielle, la période 1850-1900, c'est-à-dire la période de référence du GIEC.

² Voir GIEC, 6^e RE, GT1, RT, p.78.

³ Voir GIEC, 6^e RE, GT1, RID, p.7, Panneau (c).

« décarbonation » pour signifier la baisse des émissions anthropiques de GES n'est pas une aberration. En revanche, utiliser cette expression pour signifier la baisse des émissions du seul CO₂ nous semble inapproprié au regard du poids du méthane dans le surplus actuel d'effet de serre puisqu'il vaut un peu plus de la moitié du poids du dioxyde de carbone. Il convient aussi de s'interroger sur l'origine du méthane qui est multiple : pour l'essentiel, une part provient de l'extraction et du transport d'énergie fossile et une autre part des activités agricoles. Par la suite, nous utiliserons le terme de défossilisation de l'énergie pour qualifier la réduction puis l'arrêt de l'utilisation d'énergies fossiles. La défossilisation représente donc une partie de la décarbonation.

A côté d'émissions de GES, se trouvent des émissions anthropiques de dioxyde de soufre (SO₂), principalement dues à l'usage d'énergies fossiles. Or ce gaz possède un effet albédo, i.e. la capacité à réfléchir les rayonnements lumineux solaire. Il atténue donc le réchauffement climatique. En outre, il génère des aérosols qui ont à leur tour un effet albédo. De plus, ces aérosols agissent sur le système nuageux et en réduisent le forçage radiatif, c'est-à-dire le bilan de son effet de serre, compté positivement, et de son albédo, compté négativement (les nuages présentent à la fois un effet de serre et un albédo).

Tout au long de notre article, la mesure du forçage radiatif d'un gaz ou d'un aérosol prend en compte les effets indirects sur le climat. Par exemple, les aérosols dont le SO₂ est précurseur ont un effet direct, leur propre albédo, et un effet indirect, une réduction du forçage radiatif du système nuageux. Si bien que les émissions de SO₂ ont un effet refroidissant à trois niveaux, un effet direct (albédo), un premier effet indirect, l'albédo des aérosols dont il est précurseur, et un deuxième effet indirect, une réduction du bilan radiatif du système nuageux.

L'objet de notre article est de mettre en évidence la combinaison temporelle des effets sur le climat des différents gaz émis dans l'atmosphère par l'activité humaine et de proposer une stratégie climatique qui prenne pleinement en compte cette combinaison au regard des données scientifiques récentes et qui intègre une démarche participative selon deux volets : celui de la démocratie (conférence de citoyens) et celui de la recherche et de l'innovation (recherche action participative).

Les différents gaz contribuant au changement climatique ont des durées de vie très différentes, y compris les aérosols générés par le SO₂⁴.

Le couplage associé à la défossilisation de l'énergie, constitué d'une réduction des émissions de CO₂ et d'une réduction des émissions de SO₂, conduit, comme nous le verrons, à un forçage radiatif positif sur le court et moyen termes. Autrement dit, ce couplage pourrait accentuer le réchauffement climatique et occasionner une surchauffe qui placerait le système-Terre dans des conditions inédites qui pourraient se traduire par le déclenchement de boucles de rétroactions positives. Pour atténuer ce risque, une action complémentaire à forçage radiatif négatif serait nécessaire. Nous verrons que la réduction des émissions de méthane pourrait être cette action complémentaire, à la condition qu'elle soit suffisamment rapide et importante. Si bien que nous mettons en discussion la proposition d'une décarbonation qui place en priorité la réduction des émissions anthropiques de méthane, lesquelles sont en premier lieu issues des activités agricoles, suivies du recours aux énergies fossiles. Une telle orientation nous amène à ne pas concevoir l'atténuation du changement climatique comme une simple défossilisation de nos activités, mais de repenser l'ensemble de nos activités. Les innovations nécessaires prennent alors une autre ampleur en termes thématiques, couvrant tout à la fois les domaines scientifiques, techniques, économiques, sociaux, culturels et institutionnel en intégrant la dimension temporelle, et appellent l'implication de toute la société.

Cependant, nous montrerons que les stratégies nationales, européennes et internationales d'atténuation du changement climatique présentent des objectifs chiffrés de réduction des émissions de GES dont la hauteur en termes de méthane laisse entier le risque d'un épisode de surchauffe du climat

⁴ Voir GIEC, 5^e RE, GT1, Résumés et Foire aux questions, FAQ 7.2, p.147 et FAQ 12.3, p.171

global et d'un emballement du réchauffement qui pourrait en découler. A contrario, nous montrons qu'une politique d'anticipation du risque d'un épisode de surchauffe reposant sur une réduction rapide des émissions anthropiques de méthane requiert le développement d'un champ d'innovations dans des domaines divers, allant de celui des outils techniques pour l'agriculture à celui des outils institutionnels et juridiques internationaux.

Une discussion s'ensuivra qui nous amènera à repenser les politiques publiques de recherche et les démarches qui articulent recherches et innovations, notamment en explorant le potentiel des démarches participatives. Ces dernières proposent un élargissement de la participation à toutes les composantes de la société, sans oublier les organisations de la société civile⁵. La création d'espaces de débat à la manière des Conférences de citoyens, y compris au niveau local des territoires, peut être reliés à des dispositifs d'interface sciences et société à l'image des Boutiques des sciences susceptibles de mettre à des agendas de recherche des problématiques invisibilisées par le monde de la recherche. Une telle orientation vise à une meilleure prise en compte de l'ensemble des enjeux et des points de vue de toutes les personnes physiques et morales concernées ; un apport de l'ensemble des savoirs, scientifiques, techniques, professionnels, expérientiels et d'usages ; une adaptation aux contextes socio-culturels à différentes échelles ; une appropriation des enjeux et des résultats d'une recherche située permettant des passages à l'action pour réduire les émissions de méthane et plus largement une mobilisation plus large en termes d'atténuation et/ou d'adaptation au changement climatique.

2. Un risque de surchauffe du climat

La Conférence des parties (en anglais Conference Of the Parties) de la Convention cadre des Nations-Unies sur le changement climatique (CCNUCC) tenue en 2021 (COP26), s'est conclue par le Pacte de Glasgow⁶ où, pour la première fois, un accord politique international présentait des objectifs de réduction des émissions de dioxyde de carbone. Tout d'abord 45 % de réduction en 2030 par rapport à 2010. Puis, des émissions nettes de dioxyde de carbone nulles en 2050, c'est-à-dire la compensation des émissions anthropiques de CO₂ par une captation d'un montant équivalent. Il s'agissait d'objectifs définis politiquement en vue d'un réchauffement à la fin du XXI^e siècle ne dépassant pas 1,5°C par rapport à la période 1850-1900. Ces objectifs ont été revisités lors de la COP28, à Dubaï en 2023 : « *réduire les émissions de gaz à effet de serre de 43% entre 2019 et 2030 et de 60 % entre 2019 et 2035, et parvenir à des émissions nettes de dioxyde de carbone nulles d'ici à 2050* »⁷.

2.1. Interaction des gaz et temporalités

En 2013, le 5^e Rapport d'évaluation (RE) du Groupe intergouvernemental sur d'expert sur le climat (GIEC), l'organisation onusienne créé en 1988 par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et l'Organisation météorologique mondiale (OMM), alertait : « *Si l'on entreprend de réduire rapidement les concentrations d'aérosols sulfatés pour améliorer la qualité de l'air ou pour restreindre les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossiles, on peut dire avec un degré de confiance moyen que cette réduction risque d'entraîner un réchauffement rapide à court terme. Il existe des indications selon lesquelles la maîtrise connexe des émissions de CH₄ compenserait une partie du réchauffement dû aux sulfates, même si le refroidissement imputable à la réduction du*

⁵ Nous suivons la définition qu'en donne Jürgen Habermas : « Ce qu'on appelle aujourd'hui société civile n'inclut plus, en effet, l'économie régulée par les marchés du travail, les marchés des capitaux et des biens et constituée par le droit privé. Au contraire, son cœur institutionnel est désormais formé par ces groupements et ces associations non étatiques et non économiques à base bénévole qui rattachent les structures communicationnelles de l'espace public à la composante "société" du monde vécu. La société civile se compose de ces associations, organisations et mouvements qui à la fois accueillent, condensent et répercutent en les amplifiant dans l'espace public politique, la résonance que les problèmes sociaux trouvent dans les sphères de la vie privée. Le cœur de la société civile est donc constitué par un tissu associatif qui institutionnalise dans le cadre d'espaces publics organisés les discussions qui se proposent de résoudre les problèmes surgis concernant les sujets d'intérêt général » [HAB, 1997, p. 394].

⁶ https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2021_10_add1_adv.pdf

⁷ https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf?download=

CH₄ mettra plus de temps à se manifester que le réchauffement dû à la réduction des sulfates, car la concentration de ces substances dans l'atmosphère diminue à des échelles de temps différentes à la suite d'une réduction des émissions. »⁸.

Ce paragraphe signifie que le GIEC conçoit la réduction des émissions de méthane comme une mesure d'accompagnement partiellement efficace de la baisse des émissions d'aérosols sulfatés. De notre côté, nous suggérerons de concevoir cette réduction non pas simplement comme une mesure qui accompagne la baisse des émissions d'aérosols sulfatés, mais comme une mesure qui anticipe cette baisse, afin de pallier à la durée de vie des aérosols plus courte que celle du méthane.

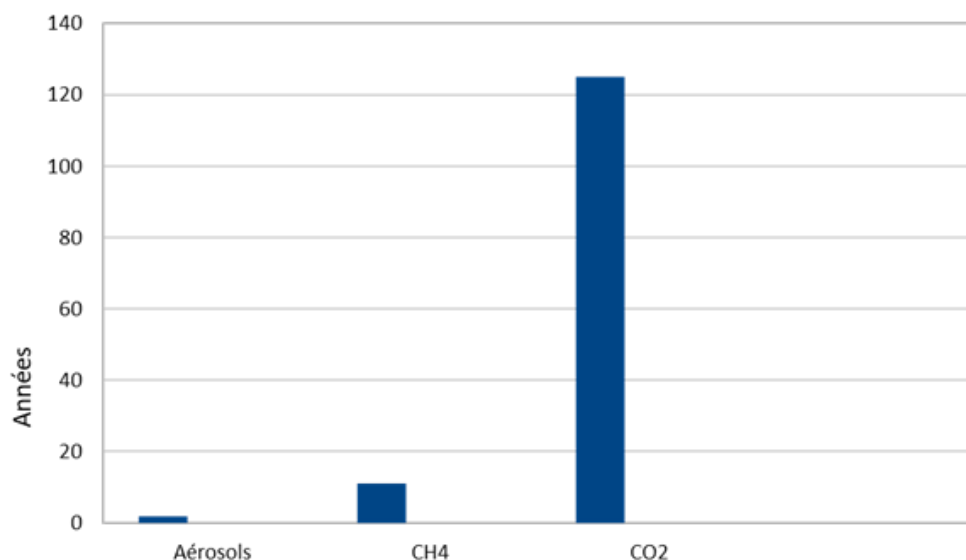


Figure 1. *Durée de vie médiane des principaux GES et des aérosols en années⁹*

Dans le cadre de la poursuite des objectifs politiques internationaux définis par la COP26, puis mis à jour par la COP28, une réduction rapide du recours aux énergies fossiles est à l'agenda des politiques nationales et, corrélativement, du monde de l'entreprise. Or, lors d'une période de réduction rapide du recours aux énergies fossiles, nous assisterons à une baisse quasiment aussi rapide de la concentration dans l'atmosphère des aérosols issus de ces énergies et corrélativement à une baisse quasiment aussi rapide de l'effet refroidissant associé à ces aérosols. En effet, la durée de vie moyenne des aérosols atmosphériques est « *de l'ordre de 1 à 2 semaines dans la troposphère et de 1 à 2 ans dans la stratosphère* »¹⁰. En revanche, la baisse de l'effet réchauffant des GES ne sera pas immédiate, notamment en ce qui concerne les émissions de CO₂, cause essentielle de la part de réchauffement due au recours aux énergies fossiles. En effet, la durée médiane de vie d'une molécule de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est actuellement d'environ 125 ans. Si bien que, toute chose étant égale par ailleurs, une période de réduction rapide du recours aux énergies fossiles pourrait occasionner un épisode d'accélération notable du réchauffement climatique, que nous appellerons épisode de surchauffe.

2.2. Les facteurs de risque d'un emballement

Le système Terre est un système complexe qui bifurque actuellement hors de la période du Quaternaire [DEL, 2023, p.68-72]. Dans ce contexte, la trajectoire future du réchauffement climatique est particulièrement imprévisible. Néanmoins, les travaux des paléoclimatologues montrent que durant

⁸ Extrait du RT de la contribution du GT1 au 5^e RE. Section 5.2, page 81.

⁹ Voir GIEC, 5^e RE, GT1, Résumés et Foire aux questions, FAQ 7.2, p.147 et FAQ 12.3, p.171

¹⁰ <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/aerosols-et-climat-par-olivier-boucher/>. Vu le 31 mai 2024.

le Quaternaire les rétroactions du système Terre aux changements climatiques étaient dans leur ensemble nettement positives, i.e. fortement amplificatrices. Qu'en sera-t-il cette fois-ci, avec le réchauffement d'origine anthropique. Des rétroactions positives sont aujourd'hui quantifiées et prises en compte par les scénarios publiés par le GIEC. C'est, notamment, le cas de la réduction de l'effet albédo des glaces polaires ou de l'augmentation de la concentration du GES H₂O dans l'atmosphère. D'autres rétroactions positives actuelles étaient imprévues ou d'ampleur imprévue par les modèles et ne sont pas prises en compte par ces scénarios, sinon de façon mineure. Par exemple les feux de forêts et plus généralement le bilan carbone (CO₂ et CH₄) du couvert forestier ou encore le dégel du pergélisol et les émissions de GES associées [FAR, 2019]. Enfin, d'autres rétroactions positives pourraient être proches d'un développement conséquent, mais ne sont pas prises en compte par les scénarios. Nous en citons ici trois au fort potentiel d'émissions de CO₂ et de CH₄ :

- la fonte de glaciers polaires [WAD, 2012 ; CHI, 2021 ; DEL, 2023, p.240-245] ;
- la désagrégation d'hydrates de méthane des fonds marins [ELL, 2011 ; DEL, 2023, p.250-256] ;
- le bouleversement du vivant marin [TAG, 2011 ; DEL, 2023, p.256-263].

Ces rétroactions positives présentent le risque d'enclencher un emballement du réchauffement climatique potentiellement irréversible. Un épisode de surchauffe de la température moyenne du climat augmentera ce risque. Plus cet épisode sera long et intense, plus le risque d'un emballement sera important.

2.3. Un gaz pivot : le méthane

Le CO₂ et le N₂O ont tous deux une durée médiane de vie dans l'atmosphère supérieure à un siècle. La réduction de leurs émissions anthropiques respectives ne peut donc pas permettre de répondre à la menace d'un épisode de surchauffe. En revanche, la durée médiane de vie du méthane dans l'atmosphère est un peu supérieure à 10 ans, soit environ dix fois moindre que celles du CO₂ et du N₂O. C'est pourquoi la réduction des émissions de méthane pourrait diminuer l'ampleur de l'épisode de surchauffe ; d'autant que, nous l'avons vu, le poids du méthane dans le surplus actuel d'effet de serre d'origine anthropique vaut environ 55 % du poids du CO₂.

Selon la contribution du Groupe de travail 1 (GT1) du GIEC au 6^e Rapport d'évaluation (RE) publiée en 2021, parmi les aérosols, les sulfates issus des émissions anthropiques de SO₂, dont plus de 75 % sont issus d'énergies fossiles¹¹, ont très probablement un effet refroidissant situé entre 0,15°C et 0,9°C¹². Il est donc très probable que le dioxyde de soufre rejeté dans l'atmosphère lors de l'exploitation d'énergies fossiles atténuerait aujourd'hui le réchauffement dans la fourchette 0,11°C – 0,68°C. Si le chiffre réel était de 0,11°C, le risque de surchauffe consécutif à la réduction rapide du recours aux énergies fossiles serait d'ampleur modérée. Par contre, si ce chiffre était proche de 0,68°C, alors le risque serait important et appellerait des décisions politiques. De plus, dans le langage du 6^e Rapport d'Évaluation du GIEC, très probable signifie une probabilité égale à 90 %¹³. La possibilité que la hauteur de l'épisode de surchauffe due à la fin des émissions de SO₂ par le recours aux énergies, dépasse 0,68°C ne peut donc pas être écartée.

3. Les stratégies nationales et internationales

Aux trois échelles, nationale, européenne et internationale, l'usage est de mesurer l'effet de serre consécutif à des émissions d'un GES donné ou du cocktail des GES en intégrant cet effet sur un siècle, et en choisissant pour unité de mesure l'effet de serre consécutif à l'émission d'une tonne de CO₂ sur un siècle. On dit alors que l'effet de ces émissions est exprimé en tonnes équivalent CO₂.

¹¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Dioxyde_de_soufre, vu le 22 mai 2024.

¹² 6^e RE, GT1, RID, p.7, Panneau (c).

¹³ 6^e RE, RT, p46, note 11.

3.1. Stratégie nationale bas carbone (SNBC)

Selon le rapport annuel 2023 du Haut conseil pour le climat (HCC), les différentes mesures en vigueur de soutien à la réduction des émissions de GES d'origine agricole « ne visent pas la réduction des émissions de méthane »¹⁴. Le méthane est ainsi le parent pauvre de la politique climatique dans le domaine agricole. Or, comme le montre les deux tableaux suivants, de l'ordre de 70 % des émissions françaises de méthane sont d'origine agricole (ruminants, gestion et épandage des effluents d'élevage).

En mars 2020, la France a révisé la SNBC¹⁵ établie en 2015. Des objectifs de réduction des émissions de méthane d'origine agricole y sont fixés pour la période 2020-2050, selon la progression chronologique suivante¹⁶, exprimée en millions de tonnes équivalent CO₂ :

- 2020 : 37
- 2030 : 33
- 2040 : 29
- 2050 : 26

Le levier de la réduction des émissions de méthane d'origine agricole n'est donc pas envisagé pour contribuer à écarter la survenue d'un épisode de surchauffe climatique dû à la réduction du recours aux énergies fossiles.

Ce constat peut être généralisé à l'ensemble des émissions de méthane tous secteurs confondus. Cela est illustré par le tableau 1 ci-dessous où sont donnés les chiffres d'un scénario de référence du SNBC menant jusqu'en 2033. L'unité est encore le million de tonnes équivalent CO₂. Nous y voyons que, à rebours de ce qui est nécessaire pour éviter un épisode de surchauffe, la vitesse de réduction est bien plus grande pour le CO₂ que pour le CH₄.

Périodes	CH ₄		CO ₂	
	Émissions en MteqCO ₂	Réduction depuis /2019-2023	Émissions en MteqCO ₂	Réduction depuis 2019-2023
2019 - 2023	53	0 %	273	0 %
2024 - 2028	48	9,5 %	225	17,5 %
2029 - 2033	44	17 %	169	38 %

Tableau 1. Scénario de référence du SNBC¹⁷

3.2. Directive européenne

La *Loi sur le climat de l'UE*¹⁸, adoptée le 28 juin 2021, contient des objectifs de réduction des émissions de GES :

- une réduction des émissions nettes de GES d'au moins 55 % en 2030 par rapport à 1990 ;
- des émissions nettes de GES nulles au plus tard en 2050.

¹⁴ Rapport annuel 2023, HCC, p. 110.

¹⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

¹⁶ SNBC 2020. Section 2.2.C.c. Page 26.

¹⁷ SNBC 2020. Section 3.4.A.a. Page 45

¹⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>

Dans ce texte législatif européen, le terme « méthane » n'apparaît pas une seule fois. Idem pour le terme aérosol ou encore le dioxyde de soufre. Aucune mesure n'y est prévue pour éviter un épisode de surchauffe.

3.3. COPs climat

Chaque année, la CCNUCC tient l'assemblée générale de ses 198 membres (197 États et l'Union européenne). Nous avons vu plus haut que lors de la COP28, à Dubaï en 2023, la CCNUCC a révisé ses objectifs de réduction des émissions de GES. Toutefois, les émissions sont calculées sur la base des effets sur le climat durant un siècle. Par conséquent, le poids du méthane est minoré si bien que les objectifs qui cadrent la politique climatique internationale sont conçus sans prendre en considération le risque d'un épisode de surchauffe.

Le mot « méthane » n'est utilisé qu'une seule et unique fois dans l'ensemble du document de conclusion de la COP28¹⁹. Cette mention met en avant la nécessité d'une réduction des émissions de méthane avant 2030 : « *Accelerating and substantially reducing non-carbon-dioxide emissions globally, including in particular methane emissions by 2030* »²⁰. Cependant, aucun argument n'est apporté pour étayer et renforcer cette particularité dans ce texte international. Aucune mention non plus n'est faite sur le risque d'un épisode de surchauffe.

4. Discussion

4.1. Pour une triple mesure des GES et de leur cocktail

Aux trois niveaux politiques, français, européen et international, les émissions de GES sont mesurées en équivalent CO₂. Pour un GES donné, dire que N tonnes équivalent CO₂ de ce GES ont été émises signifie que l'effet de serre de ce GES émis est égal à l'effet de serre de N tonnes de CO₂ émis. Toutefois, cela n'a de sens que s'il est précisé la longueur de l'intervalle de temps durant lequel l'effet de serre est calculé. En effet, les durées médianes de vie des GES sont extrêmement diverses, plus d'un siècle pour le CO₂, à peine une décennie²¹ pour le CH₄.

Conformément à ce qu'a adopté la CCNUCC dès les années 1990, l'usage veut que si la longueur de l'intervalle n'est pas précisée, il s'agit alors de cent ans. Cela est observé et analysé par le GIEC en ces termes : « *The Global Warming Potential (GWP) for a time horizon of 100 years was (...) adopted as a metric to implement the multi-gas approach embedded in the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and made operational in the 1997 Kyoto Protocol. The choice of time horizon has a strong effect on the GWP values — and thus also on the calculated contributions of CO₂ equivalent emissions by component, sector or nation. There is no scientific argument for selecting 100 years compared with other choices. The choice of time horizon is a value judgement because it depends on the relative weight assigned to effects at different times.* »²².

Ainsi, dès la décennie 1990 un accord politique international a consisté à ne pas prendre en considération la possibilité offerte par le méthane d'une atténuation rapide du réchauffement climatique.

Vu la nécessité d'anticiper la baisse des concentrations d'aérosols issus du SO₂ émis lors du recours aux énergies fossiles, nous proposons que soient désormais utilisées trois mesures de la masse des émissions des différents GES, l'une en tonnes équivalent CO₂ sur cent ans, l'autre en tonnes équivalent CO₂ sur vingt ans, la dernière en tonnes équivalent CO₂ instantané.

¹⁹ https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma2023_L17_adv.pdf?download=

²⁰ Item 28. (f).

²¹ GIEC, 5^e RE, GT1, 6.3.3.3, p.509.

²² GIEC, 5^e RE, GT1, 8.7.1.2, p.711-712.

L'effet de serre instantané d'une mole de CH₄ vaut environ 65 fois celui d'une mole de CO₂. Cependant, la masse d'une mole de CH₄ égale 16/44 fois la masse d'une mole de CO₂. Si bien que l'effet de serre instantané d'une tonne de CH₄ vaut environ 180 fois celui d'une tonne de CO₂. Par conséquent, une tonne de CH₄ vaut environ 180 tonnes équivalent CO₂ instantané. Par contre, selon le GIEC²³, une tonne de CH₄ vaut 84 tonnes équivalent CO₂ sur 20 ans, et trois fois moins sur 100 ans, soit 28 tonnes équivalent CO₂.

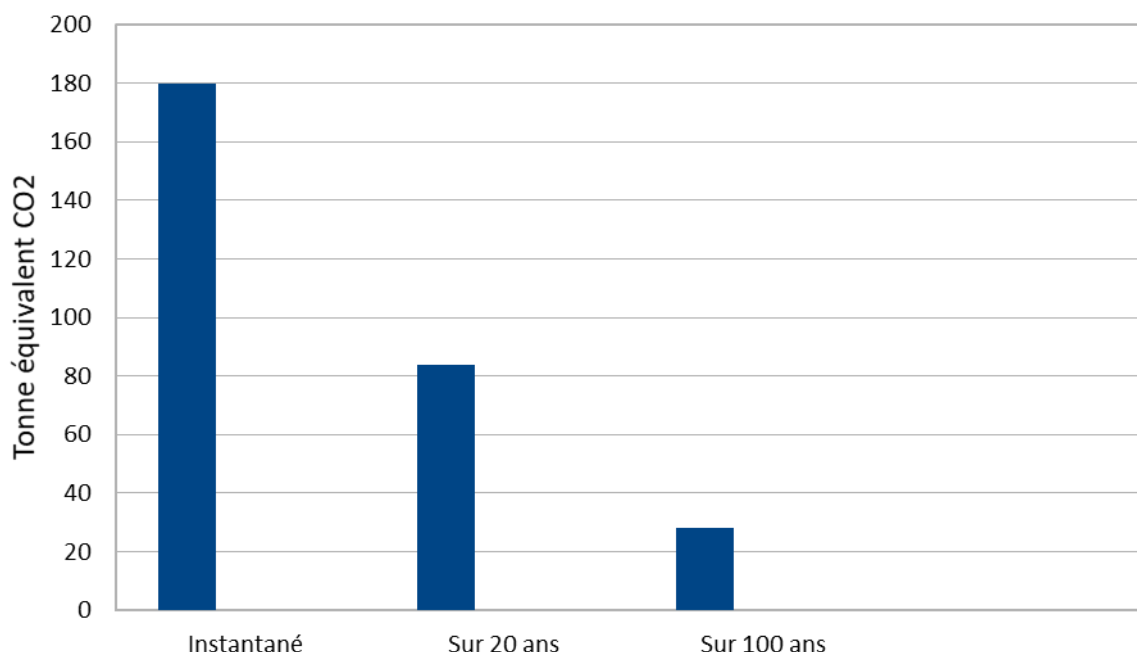


Figure 2. Valeur de l'émission d'une tonne de méthane en tonnes équivalent CO₂²⁴

4.2. Quelle stratégie d'atténuation ?

Notre conclusion est que la stratégie d'atténuation du changement climatique devrait être fondée sur la prise en considération de l'ensemble des émissions anthropique de gaz ayant un forçage radiatif (effet de serre et albédo) et d'aérosols (émis de façon directe ou indirecte), et de leurs durées de vie respectives. C'est une condition nécessaire à la définition d'un processus global qui réduise au maximum les risques de surchauffe de la température moyenne du système-Terre pouvant conditionner un emballement du changement climatique. Compte tenu de ces incertitudes, de la gravité et des aspects irréversibles du risque d'un emballement du réchauffement, le recours au principe de précaution nous semble indispensable. La traduction de ce principe serait en particulier une réduction des émissions anthropiques de méthane plus rapide que celle du recours aux énergies fossiles, sans pour autant affaiblir les ambitions de réduction du recours à ces dernières.

Quelques chiffres qui illustrent l'importance qu'il y aurait à anticiper le risque d'un épisode de surchauffe en réduisant sans attendre et fortement les émissions anthropiques de méthane :

- Aujourd'hui, la contribution du méthane d'origine anthropique au réchauffement est, selon le GT1 du GIEC, 6^e RE, très probablement situé entre 0,3°C et 0,8°C²⁵, à comparer à la fourchette située entre 0,11°C et 0,68°C du refroidissement dû au SO₂ émis lors de l'exploitation des énergies fossiles.

²³ GIEC, 5^e RE, GT1, table 8.7, p.714.

²⁴ Instantané : voir [SHI, 2024, p.1], une valeur d'environ 65 y est donnée en se basant sur les moles, d'où une valeur d'environ 180 en se basant sur la masse.

Sur 20 ans et sur 100 ans : voir GIEC, 6^e RE, GT1, Chap.7, Section 7.6.1.5., Table 7.15, p.1017

²⁵ 6^e RE, GT1, RID, p.7, Panneau (c).

– Si toute émission anthropique de SO₂, de CO₂ et de CH₄ cessait dès aujourd’hui, les durées de vie respective de ces trois gaz se traduiraient par une baisse de la moitié de leur excès anthropique de concentration dans l’atmosphère en, respectivement, quelques heures, un peu plus d’un siècle, environ une décennie. Toutefois, c’est un effet indirect du SO₂ qui est conséquent, à savoir l’effet albédo (forçage radiatif négatif) d’aérosols dont le SO₂ est un précurseur. Plus de la moitié de ceux-ci disparaissent de l’atmosphère en moins de deux ans.

– Si les émissions de SO₂ dues à l’utilisation des énergies fossiles et celles de CH₄ anthropique cessaient simultanément et instantanément, une décennie plus tard le forçage radiatif négatif des émissions antérieures de SO₂ dues aux énergies fossiles serait devenu presque négligeable, alors que le forçage radiatif positif des émissions anthropiques antérieures de CH₄ serait simplement réduit d’environ un facteur deux. Deux décennies après l’arrêt de ces émissions, les forçages radiatifs correspondant serait négligeable pour le SO₂ et réduit d’environ un facteur 4 pour le CH₄.

5. Les priorités de l’innovation

Les mesures du poids climatique du méthane, respectivement instantanée et sur 20 ans, permettent de fixer des objectifs chiffrés en vue d’éviter un épisode de surchauffe et de réduire le risque d’un enclenchement de rétroactions positives au réchauffement climatique et d’un emballement de ce dernier. Viser ces objectifs présente la nécessité d’innovations techniques, économiques, institutionnelles et sociétales et de penser leurs interrelations.

À l’échelle mondiale, les émissions anthropiques de méthane sont issues²⁶ pour environ 40% d’activités agricoles (rizières en surface inondée, élevage de ruminants), pour environ 35 % de fuites liées à l’exploitation des énergies fossiles et pour environ 20 % de déchets (décharges, traitement des eaux...). Les quelques pour cent restants résultent essentiellement de combustions incomplètes de biomasse, notamment de bois à usage domestique (chauffage et cuisine).

Il existe une grande diversité de procédés techniques de réduction des émissions de méthane d’origine agricole : modification des régimes alimentaires des ruminants ; recours à des races moins émettrices de méthane ; allongement du nombre d’années de production des vaches, brebis et chèvres ; mode de culture du riz qui réduit et fragmente le recours à l’irrigation ; récupération du méthane issu de la fermentation des fumiers... Ces procédés sont à mettre au point ou à perfectionner, et à développer à l’échelle internationale. Ils requièrent des innovations techniques. Le déploiement de procédés techniques ne peut suffire, en raison de l’urgence qu’il y a à réduire les émissions de méthane afin d’anticiper et non pas simplement accompagner la baisse de l’effet refroidissant des aérosols. C’est pourquoi se pose la question de la réduction de certaines productions agricoles et de certaines consommations alimentaires. Réduire de façon conséquente la consommation de viandes de ruminants, de produits laitiers et de riz doit se traduire au niveau individuel des comportements de consommation, ce qui exige l’engagement collectif de la décision politique.

L’utilisation de ces procédés techniques aura le plus souvent un coût qui se traduira par une hausse du prix des produits associés, que ce soient du lait et ses dérivés, de la viande bovine ou ovine ou encore du riz. Par conséquent, selon les régions du monde, en fonction des situations économiques, sociales et culturelles, le recours à ces procédés, mais aussi la réduction de certaines productions agricoles et de certaines consommations alimentaires, devront être débattus dans des forums hybrides [CAL, 2001] laissant une large part à toutes les composantes de la société, y compris les organisations locales de la société civile. Les orientations d’innovations techniques, socio-économiques, financières, organisationnelles, institutionnelles qui en découleraient pourraient être soutenues par un fonds mondial de financement.

²⁶ GLOBAL METHANE ASSESSMENT: 2030 BASELINE REPORT. PNUE et Climate and Clean air coalition.

<https://www.unep.org/resources/report/global-methane-assessment-2030-baseline-report>

Quant au méthane émis lors de l'exploitation des énergies fossiles, il peut être réduit en privilégiant les modes d'exploitation de ces énergies qui libèrent le moins de méthane possible dans l'atmosphère, par exemple en évitant la fracturation hydraulique [HOW, 2011 ; TOL, 2012], mais aussi en développant l'utilisation de procédés de réduction des fuites²⁷ [SHI, 2024, p.12]. Cependant, ces solutions ne suffiront pas pour satisfaire l'urgence que présente la réduction des émissions de méthane, car elle ne s'accompagne pas automatiquement de leur utilisation partout où c'est possible et souhaitable, pour partie en raison du coût financier que présente ces solutions [HOG, 2020].

Des innovations en termes de réglementation, de traçabilité et de contrôle se développent afin de limiter les fuites. Elles pourraient être amplifiées et largement déployées aux échelles nationales et internationales. Des plafonds d'émission de méthane par unité d'énergie fossile pourrait être appliqué par des nations ou l'UE, voire à l'échelle internationale. Les productions dépassant ces plafonds seraient exclues du marché national, européen ou international, ou pénalisées financièrement.

6. La participation

Le changement climatique a des impacts multiples et systémiques sur le système-Terre avec des conséquences socio-économiques, sanitaires et culturelles de plus en plus visibles. Ce changement devrait nous conduire à raisonner avec la pensée du complexe [GUE, 2015] en tenant compte de conditions d'incertitude dans la mise en œuvre de solutions d'atténuation et d'adaptation [CAL, 2001 ; FUN, 1993]. Dans nos sociétés modernes, il est tentant de penser ces transitions par une planification technoscientifique imposée par des experts. Comme nous l'avons vu précédemment, il est parfois commode d'invisibiliser certains critères qui s'avèrent déterminant lorsque l'on prend en compte la temporalité des processus de transformation. En nous appuyant sur cette incomplétude, il est intéressant de se positionner dans une vision non descendante des transitions permettant d'ouvrir les possibles. Cette orientation nécessite des infrastructures d'interfaces sciences et société renouvelées avec des périmètres élargis notamment vers les organisations de la société civile d'intérêt général. Elle requière aussi d'étendre les contextes d'intervention au plus près des territoires comme le propose l'un des scénarios pour 2050 de l'Ademe²⁸. Les recherches situées qui en découlent pose la question récurrente de la généralisation des solutions envisagées. Dans notre approche, la généralisation se situe au niveau du processus qui devient le centre des préoccupations. Il est en rapport direct avec celle de l'innovation sous contraintes et avec le défi d'en accepter non seulement les résultats produits, mais aussi la démarche en elle-même placée sous le sceau du tâtonnement et de l'incertitude. En d'autres termes, cette orientation nous entraîne à repenser le développement scientifique et la démocratie technique, à nous ouvrir à la recherche participative et à réexaminer les formes de gouvernance de nos organisations.

En ce qui concerne le climat, les Groupes régionaux d'experts sur le climat (GREC), sont en train d'émerger dans presque toute les régions françaises²⁹. Ils font référence au GIEC mais avec des missions qui tiennent compte des contextes régionaux. Ils mettent à disposition les connaissances scientifiques les plus récentes pour éclairer les décisions prises en termes de politique publique ou de développement socio-économique régionaux. C'est une organisation frontière entre les scientifiques locaux de différentes disciplines, les représentants des territoires, les acteurs de l'économie et les membres des organisations de la société civile. Les activités des GRECs sont au service de la transition écologique en incluant les dimensions énergétiques, environnementales, climatiques, sanitaires, sociales, économiques. Les GRECs dépendent beaucoup de leur contexte territorial mais ils partagent des objectifs communs à l'image des activités du GIEC : dissémination des résultats scientifiques au niveau régional dans toutes les composantes de la société, évènements de médiation scientifique pour

²⁷ Voir *Global Methane Assessment*. Résumé pour décideurs. Climate & Clean Air Coalition to reduce short-lived climate pollutants et PNUE. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/35917/GMA_ES.pdf

²⁸ <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios/#cooperations-territoriales>

²⁹ <https://www.cnfcg.fr/index.php/grec-en>

sensibiliser au changement climatique, promotion de stratégies d'implication de parties prenantes avec des scientifiques pour améliorer la résilience territoriale et passer à l'action.

Ce dernier objectif est sans doute le plus pertinent à une échelle régionale. Il s'opère par une volonté de renforcement d'une part de l'interdisciplinarité, et d'autre part de l'interface sciences-société, pour aider les prises de décisions en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Sur le premier volet, l'approche transversale, convoquant des connaissances scientifiques parcellisées sur des problématiques générales, peut ne pas faciliter la compréhension du problème. Il est alors nécessaire de resserrer la problématique dans des contextes particuliers pour produire de nouvelles connaissances permises par des regards disciplinaires variés et pertinents. Sur le second volet, réduire le terrain d'étude et non pas la discipline scientifique rend viable d'associer d'autres parties prenantes que des chercheurs que sont des acteurs issus des milieux institutionnels, socio-économiques et des organisations de la société civile. La constitution d'un tel collectif de recherche hybride rend tangible le concept de recherche transdisciplinaire incluant savoirs académiques et expérientiels. L'importance en terme méthodologique est alors donnée par le processus de recherche dont la description précise est requise [DEL, 2015]. Le réseau des GREC commence à se structurer. Le développement de méthodologies d'intelligence collective est identifié comme un objectif commun. En effet, il serait intéressant de développer la capacité des GREC à coconstruire des projets en incluant des scientifiques de différentes disciplines et des parties prenantes diverses allant jusqu'à l'inclusion de citoyens « concernés » [DEW, 2010] par cette problématique.

Cette orientation est prise au sérieux par le GREC Haut-de-France en s'appuyant sur les travaux développés au sein de la Boutique des Sciences de l'Université de Lille³⁰. Une telle orientation qui s'appuie sur le renforcement des liens entre les scientifiques et la participation citoyenne n'est pas nouvelle notamment au niveau européen³¹. Plus récemment, nous pouvons l'observer par le développement des sciences et recherches participative³² qui s'appuient sur différents courants dont celui de la « *démocratie technique* » apparu au début du XXI^e siècle [CAL, 1998 ; CAL, 2001 ; LEQ, 2015], lui-même issu de travaux scientifiques interdisciplinaires plus fondamentaux en *Science and technology studies* (STS) [FEL, 2017]. La démocratie technique s'appuie sur la constitution de « *forums hybrides* » réunissant scientifiques, experts, praticiens et citoyens. Une limite apparaît néanmoins lorsqu'il s'agit de traiter une problématique émergente nécessitant un travail de recherche, c'est-à-dire « *la conférence, et c'est une des limites évidentes de la procédure, ne peut aller jusqu'à mettre en pratique une certaine forme de collaboration entre recherche de plein air et recherche confinée.* » pour reprendre les termes de Calon et al [CAL, 2001, p 282]. C'est particulièrement vrai pour des questionnements transversaux comme ceux liés au changement climatique. Les démarches de recherche participative sont particulièrement pertinentes sur ce genre d'interface par leur capacité à associer non seulement des connaissances scientifiques de différentes disciplines mais aussi pour associer d'autres types de savoirs produits par des membres d'organisations de la société civile ou des groupes de citoyens concernés par ces problématiques [BOC, 2018, 2021, 2022a, 2022b, 2022c]. Ces démarches gagnent à être capitalisées au sein de dispositifs stables d'interface sciences-société comme les Boutiques des sciences [SAV, 2017 ; LEF, 2019 ; B, 2022a ; ANG, 2022].

Les expériences de recherches participatives rencontrent encore des difficultés pour un développement plus large. Plusieurs hypothèses expliquent cet essor modéré comme par exemple des chercheurs encore peu enclins à considérer les non scientifiques comme partenaires, mais aussi le déficit de méthodologies suffisamment robustes pour associer des acteurs hétérogènes aux savoirs différents. Nous avons identifié ce dernier point comme un frein important à leurs développements. La constitution d'un collectif de recherche hybride interroge la posture de toutes les parties prenantes qu'il

³⁰ <https://rechercheparticipative.univ-lille.fr/>

³¹ Felt U. & Wynne B. (2007), *Taking European knowledge society seriously*, Report of the Expert Group on Science and Governance, European Commission, Office for Official publications of the European communities.

³² Rapport de F. Houllier et J-B. Merilhoud-Goudart (2016), Les sciences participatives en France : Etats des lieux, bonnes pratiques et recommandations, 63 p. <https://hal.science/hal-02801940/>

convient d'objectiver avant le démarrage du projet. Dans le cas des recherches participatives, le chercheur n'est pas à l'origine de la problématique de recherche, mais participe à la définition fine de la question en fonction de ses thématiques de recherche. De son côté, le partenaire non scientifique n'a pas un rôle passif, mais coopère et s'implique dans la recherche. L'intervention d'un tiers (facilitateur, accompagnateur, intermédiaire) constitue alors une valeur ajoutée dans la collaboration surtout lorsque ce tiers est susceptible d'apporter une ingénierie participative adaptée au contexte des recherches participatives. Dans ce dernier cas, nous parlons de tiers-accompagnateur avec une pleine implication dans le projet de recherche au même titre que les autres parties prenantes, chercheurs et acteurs. En d'autres termes, il s'agit de résoudre la problématique du « comment » que se pose les parties prenantes souhaitant garantir leurs intérêts tout en faisant une recherche participative de qualité.

Le cadre d'intervention et l'organisation interne de ce type de dispositifs dépendent de leur contexte d'émergence et présentent une grande diversité de structure. Pour les Boutiques des sciences, c'est le processus de traitement d'une demande sociale de recherche qui est commune. Il se décline généralement selon sept phases : (i) le recueil de la demande suivi par (ii) la traduction en problématique scientifique, point critique et principale valeur ajoutée de l'accompagnement, (iii) la sélection des demandes avec l'aide d'un conseil scientifique, (iv) l'identification d'une équipe de recherche traitant du sujet. Il s'engage alors (v) le travail de recherche proprement dit qui (vi) est restitué aux acteurs et fait l'objet d'une diffusion large des résultats. Il se termine par (vii) une phase réflexive d'évaluation de la recherche qui doit permettre d'améliorer le dispositif.

Pour atteindre les objectifs décrits ci-dessus tout en garantissant les intérêts des parties prenantes, chercheurs et acteurs, l'option choisie a été de développer au sein de la Boutique des sciences de l'Université de Lille une approche de Recherche Action Participative (RAP) mis en œuvre par l'équipe des tiers-accompagnateurs. Nous nous sommes inspirés de travaux canadiens [CHE, 2013 ; BLA, 2018]. Ces travaux ont été introduits en France par la constitution du Groupement de recherche CNRS PARCS (Participatory Action Research and Citizen Science)³³ entre 2014 et 2019. Ce courant de RAP élabore une ingénierie d'accompagnement de la participation en sciences pour rendre la démarche de recherche en co-production la plus efficace possible, incluant les phases de co-construction de la question de recherche, de collecte de données, d'analyse et d'interprétation des résultats. Le processus de recherche est basé sur un corpus d'une cinquantaine de « moyens habiles » qu'il convient d'agencer en fonction des contextes d'intervention, du temps disponible et des publics visés. Ces moyens sont regroupés en trois catégories qui reflètent trois questions fondamentales. Quels sont les problèmes auxquels font face les populations ? Qui sont les acteurs affectés par la situation ou ayant une capacité d'intervention ? Quels sont les connaissances pertinentes et les options ou possibilité d'action ? Cette arborescence permet de choisir les moyens les plus appropriés à la situation en tenant compte des questions et des préoccupations transmises par le collectif de recherche et d'action.

L'innovation est aujourd'hui fortement associée à la production de connaissance au sein de disciplines aussi bien des sciences de la nature que des sciences humaines et sociales. Les objectifs assignés pour l'innovation relèvent essentiellement de l'innovation technoscientifique. Les retombées de la co-production de connaissances posent la question de l'élargissement des objectifs de l'innovation en termes par exemple de soutenabilité ou de prise en compte des non-humains. Cette innovation élargie se traduit également dans des processus ascendants et interactifs [BAR, 2020] au sein de collectifs multi-acteurs pouvant associer des chercheurs de différentes disciplines. Comme nous l'avons vu précédemment et sans être exclusif, les approches de recherche action participative, les fonctions d'intermédiation, les dispositifs d'interface sciences-société ou société-sciences sont trois leviers importants dans la réussite de l'innovation élargie.

Dans le cas du changement climatique et de ses conséquences, les thèmes de l'atténuation et de l'adaptation qui nécessite des solutions originales, sont particulièrement bien en phase avec

³³ <https://www.gdrparcs.cnrs.fr/>

l'innovation élargie. Ce chemin de transition associé à des dispositifs stables comme les GREC, peut être aisément tracé compte tenu des avancées actuelles de la participation en sciences. La constitution d'un réseau de GREC intégrés dans leur contexte territorial et dialoguant au niveau national pourrait être un puissant levier non seulement de sensibilisation, d'acculturation à la pensée du complexe et d'intégration des données scientifiques les plus récentes au plus près des préoccupations citoyennes, mais aussi de capitaliser sur les expériences et les actions issues de processus situés et adaptatifs.

7. Conclusion

La question temporelle de la durée de vie des différents gaz présent dans l'atmosphère n'est pas pleinement pris en compte sur l'ensemble du triptyque recherche-expertise-politique [DEL, 2023]. Un épisode de surchauffe de la température moyenne du système-Terre accélérant le changement climatique pourrait être une conséquence d'une réduction rapide du recours aux énergies fossiles. Dans ce cas, c'est principalement la décroissance des émissions de SO₂, précurseur d'aérosols, qui aurait un impact par défaut d'albédo. Aux niveaux politiques français, européen et international, ces données scientifiques issues de considérations temporelles plus difficiles à saisir ne sont pas prises en considération par les textes législatifs nationaux et européens et par les accords internationaux. Ces trois niveaux, parties intégrantes de la mobilisation pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, sous-investissent, sinon délaissent, ces questions qui peuvent être considérées comme cruciales.

Il s'ensuit que l'outil stratégique de la réduction des émissions anthropiques de méthane (CH₄) - qui avec la réduction des émissions de CO₂ compose la décarbonation des activités humaines - sur lequel reposera une solution à cette problématique de risque d'un épisode de surchauffe, est négligé. Cependant, les implications d'une telle stratégie est lourde de conséquence car elle touche à des évolutions sociétales conséquentes sur nos modes de production et de consommation, en particulier relatifs à l'énergie, l'agriculture et l'alimentation. Il semble dès lors difficile de s'affranchir d'une échelle infranationale dans la mise en œuvre de solutions. À cet égard, les GREC ont un rôle majeur à jouer notamment sur deux leviers que nous avons identifié : une dimension de forum hybride prolongé par une dimension de recherche action participative.

Les forums hybrides tels que les conférences de citoyens participent à la diffusion des connaissances à toutes les échelles géographiques. La conception de tels forums au niveau régional permet de mettre en débat les connaissances scientifiques les plus récentes en matière de changement climatique comme le cas a priori contre intuitif de surchauffe planétaire lié à la défossilisation de l'énergie par un effet simultanée de baisse des émissions de SO₂. Dans ce cas, la donnée temporelle, faiblement discutée, est prépondérante. En d'autres termes, ces forums permettent aussi de mieux intégrer par son processus apprenant les aspects systémiques du changement climatique et par voie de conséquence, la pensée du complexe.

Les espaces de débats et de concertations sont aussi des lieux permettant l'émergence de questionnements avec différents niveaux de profondeur. En effet, de nombreuses questions relèvent du domaine de l'expertise, publique ou privée, et peuvent être résolues dans un dialogue entre experts, citoyens et politiques publiques pourvu qu'il soit animé. Des questions plus difficiles peuvent aussi apparaître qui nécessiterait un travail de recherche. Pour ce faire, les GREC pourraient impulser des démarches participatives de recherche et d'innovation. Une approche de recherche action participative est une voie intéressante car elle permet (i) de coupler une co-production de savoirs avec la recherche, (ii) d'avoir une meilleure appropriation des résultats pour des applications à des problématiques concrètes dans l'action et (iii) d'impliquer des citoyens ou des groupes concernés au travers de leur participation active à toutes les étapes du projet. C'est en ce sens qu'une collaboration est née entre le GREC Hauts-de-France et la Boutique des Sciences de l'Université de Lille pour compléter nos réseaux d'acteur et développer une approche de recherche originale et pertinente sur les questions climatiques dont les retombées sont de l'ordre de l'innovation élargie.

Cette orientation des GREC ne se limite pas à l'action locale qui sous-tendrait le paradigme « agir local, penser global ». Un réseau international des GREC pourraient favoriser des synergies entre les actions locales diffuses, voire contribuer à des coordinations au niveau international et à des définitions et mises en œuvre renouvelées des stratégies nationales et internationales initiées *par-le-bas*. Il s'agit alors d'affirmer un autre paradigme défini par « penser local, agir local ».

8. Bibliographie

- [ANG, 2022] Anginot R., BelaënF., Chauveau H., Fiorini C., Mary J., Millot G., Moity-Maïzi P., Thomas M., « Le renouveau des Boutiques des Sciences en pratiques et en question : focus sur deux dispositifs territorialisés à l'interface Sciences-Société. » In Bocquet B. & Blangy S. (dir), Sciences en société partagées, Technologie et Innovation, pp1-17, 2022. https://www.openscience.fr/IMG/pdf/iste_techinn22v7n4_1.pdf
- [BAR, 2020] Barré R., « L'intermédiation : un dispositif de coproduction d'innovations élargies Synthèse des enseignements des séminaires. » Cahiers de l'action, 2020/1 N° 55. pp. 69-78, 2020.
- [BLA, 2018] Blangy S., Bocquet B., Fiorini C., Fontan J.M., Legris M., Reynaud C., « Recherche et innovation citoyenne par la Recherche Action Participative », Technologie et Innovation, 18, 3, 1-17, 2018.
- [BOC, 2018] Bocquet B., « Les sciences en société : voies de la recherche et de l'innovation responsables », dans D. Uz-unidis (dir.), Recherche académique et innovation - La force productive de la science, Peter Lang, Bruxelles, pp203-250, 2018.
- [BOC, 2022a] Bocquet B., Ienna F., Legris M., Lefebvre B., « Recherche participative, clé des recherches et innovations responsables. Le cas du dispositif Boutique des sciences de l'Université de Lille », Technologie et Innovation, Vol.22-7, pp1-19, 2022a.
- [BOC, 2022b] Bocquet B., Blangy S., « Des « sciences en société » partagées : comment coopérer et faire de la recherche autrement ? », In Bocquet B. & Blangy S. (dir), Sciences en société partagées, Technologie et Innovation, pp1-11, 2022b.
- [BOC, 2022c] Bocquet B., « Participation citoyenne en recherche scientifique », Cahiers d'histoire du Cnam, 2022c.
- [CAL, 1998] Callon M., « Des différentes formes de démocratie technique », Annales des mines, 9, 63-73, 1998.
- [CAL, 2001] Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., « Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique », Édition révisée 2014, Paris : Seuil, 2001.
- [CHE, 2001] Chevalier J.M., Buckles D.J., « Participatory Action Research - Theory and methods for engaged inquiry », London and New-York, Routledge, 2013.
- [CHR, 2021] Christiansen J. R., Röckmann T., Popa M. E., Sapart C. J., Jørgensen C. J., « Carbon Emissions From the Edge of the Greenland Ice Sheet Reveal Subglacial Processes of Methane and Carbon Dioxide Turnover », Journal of geophysical research. Biogeosciences, 2021-11, Vol.126 (11), p.n/a, DOI: 10.1029/2021JG006308, 2021.
- [DEB, 2015] Deblonde M., « Responsible research and innovation: building knowledge arenas for glocal sustainability research », Journal of Responsible Innovation, 2(1), 20-38, 2015.
- [DEL, 2023] Delepouve M., « Le GIEC une dialectique science et politique De la quantophrénie et de l'imprévisible », Thèse de doctorat, CNAM, Paris, <https://theses.hal.science/tel-04166748>., 2023.
- [DEW, 2010] Dewey J., « Le public et ses problèmes », Paris : Gallimard, (1927), 2010.
- [ELL, 2011] Elliott S., Maltrud M., Reagan M., Moridis G., and Cameron-Smith P., « Marine methane cycle simulations for the period of early global warming », J. Geophys. Res. Biogeosci., 116, G01010, doi:10.1029/2010JG001300, 2011.
- [FAR, 2019] Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L., Walker D. A., Kokelj S. V., Nicolsky D., « Climate Change Drives Widespread and Rapid Thermokarst Development in Very Cold Permafrost in the Canadian High Arctic », Geophysical Research Letters, 10 juin 2019.
- [FEL, 2017] Felt U., Fouché R., Miller C. A., Smith-Doerr L., *The Handbook of Science and Technology Studies*, MIT Press, Cambridge, 2017.
- [FUN, 1993] Funkowick S.O., Ravetz J.R., « Science for the post-normal age », *Futures*, p.739-755, 1993.
- [GUE, 2015] Guespin-Michel J., *Pensée du complexe et émancipation*, Éditions du Croquant, Paris, 2015.
- [HAB, 1997] Habermas J., *Droit et démocratie : entre faits et normes*, Gallimard, Paris, 1997.

- [HOG, 2020] Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A. Klimont Z., Rafaj Peter and Schöpp Wolfgang, « Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe –results from the GAINS model », *Environ. Res. Commun.*, **2** 025004 DOI 10.1088/2515-7620/ab7457, 2020.
- [HOW, 2011] Howarth R., Santoro R., Ingraffea A., “Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations.”, *Climatic Change* 106 (2011): 679-690, DOI:10.1007/S10584-011-0061-5, 2011.
- [LEF, 2019] Lefebvre B, Savoia A, Bocquet B, « Perception et émergence d'une Boutique des sciences dans la région des Hauts-de-France », *Nature Science Société*, 27(3), p. 342-349, 2019.
- [LEQ, 2015] Lequin Y.C, Lamard P., « Éléments de démocratie technique », Belfort : Presses de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2015.
- [SAV, 2017] Savoia A., Lefebvre B., Millot G., Bocquet B., « The Science Shop Concept and its Implementation in a French University », *Journal of Innovation Economics & Management*, 2017/1 (22), p. 97-117, 2017.
- [SHI, 2024] Shindell D, Sadavarte P, Aben I, Bredariol TdO, Dreyfus G, Höglund-Isaksson L, Poulter B, Saunio M, Schmidt GA, Szopa S, Rentz K, Parsons L, Qu Z, Faluvegi G and [MAA, 2024] Maasakkers JD. « The methane imperative », *Front Sci* 2:1349770, doi: 10.3389/fsci.2024.1349770, 2024.
- [TAG, 2011] Tagliabue A., Bopp L. et Gehlen M., « The response of marine carbon and nutrient cycles to ocean acidification: Large uncertainties related to phytoplankton physiological assumptions », *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 25(3), 10.1029/2010GB003929, 2011.
- [TOL, 2012] Tollefson J., « Air sampling reveals high emissions from gas field », *Nature*, Vol. 482, 9 February, 2012.
- [WAD, 2012] Wadham J., Arndt S., Tulaczyk S., Stibal M., Tranter M., Telling J., Lis G. P., Lawson E., Ridgwell A., Dubnick A., Sharp M. J., Anesio A. M., Butler C. E. H., « Potential methane reservoirs beneath Antarctica », *Nature*, 488, 633–637 (2012), <https://doi.org/10.1038/nature11374>, 2012.