



Documents de Travail

N° 2020/4 • Juillet 2020

IMPACT ÉCONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : REVUE DES MÉTHODOLOGIES D'ESTIMATION, RÉSULTATS ET LIMITES

Nicolas LANCESSEUR
Charles LABROUSSE
Mathieu VALDENAIRE
Mounira NAKAA

IMPACT ÉCONOMIQUE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : REVUE DES MÉTHODOLOGIES D'ESTIMATION, RÉSULTATS ET LIMITES

Nicolas Lancesseur

Charles Labrousse

Mathieu Valdenaire

Mounira Nakaa

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

***Nicolas Lancesseur** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances*

nicolas.lancesseur@dgtresor.gouv.fr (+33 1 44 87 14 29)

***Charles Labrousse** est étudiant à l'École d'économie de Paris et a participé à cette étude en tant que stagiaire à Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances*

***Mathieu Valdenaire** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances*

mathieu.valdenaire@dgtresor.gouv.fr (+212 5 37 68 98 17)

***Mounira Nakaa** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances*

mounira.nakaa@dgtresor.gouv.fr (+33 1 44 87 14 55)

Table des matières

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	4
REMERCIEMENTS.....	4
INTRODUCTION.....	5
1. REVUE DES IMPACTS MACROÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE MONDIALE	7
1.1 METHODOLOGIES D'ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ACTIVITE.....	7
1.1.1 <i>La fonction de dommage : un outil synthétique d'évaluation</i>	7
1.1.2 <i>Approche énumérative</i>	8
1.1.3 <i>Les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) permettent un bouclage macroéconomique des impacts</i>	9
1.1.4 <i>Estimations statistiques et économétriques : renforcement des fondements empiriques</i>	11
1.2 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS RECENSÉS DANS LA LITTÉRATURE.....	12
1.2.1 <i>Parmi les études recensées, la fourchette d'estimation des dommages est comprise entre 3,6 % et 30 % du PIB mondial à l'horizon 2100</i>	13
1.2.2 <i>Différences de résultats selon les méthodologies</i>	15
1.3 LIMITES GÉNÉRALES À L'ESTIMATION DES IMPACTS ÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	16
1.3.1 <i>L'incertitude liée à la dynamique climatique</i>	17
1.3.2 <i>L'incertitude liée à la dynamique des impacts économiques</i>	17
1.3.3 <i>L'incertitude liée aux instruments de mesure économique</i>	18
1.3.4 <i>Enjeu des scénarios « extrêmes »</i>	19
2. IMPACTS SECTORIELS ET SOCIO-ÉCONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	21
2.1 IMPACTS SECTORIELS	22
2.1.1 <i>Secteur agricole</i>	22
2.1.2 <i>Secteur énergétique</i>	23
2.1.3 <i>Secteur des infrastructures</i>	24
2.1.4 <i>Secteur financier</i>	25
2.1.5 <i>Secteur du tourisme</i>	26
2.2 IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES.....	27
2.2.1 <i>Santé</i>	27
2.2.2 <i>Productivité</i>	28
2.2.3 <i>Commerce international</i>	29
2.2.4 <i>Instabilité politique</i>	30
CONCLUSION.....	33
BIBLIOGRAPHIE.....	35

Résumé

Le consensus scientifique, et notamment le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), est bien établi sur l'importance des changements climatiques associés à l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Toutefois, l'évaluation des impacts économiques de ces changements climatiques se heurte à des difficultés pratiques et théoriques. Le présent travail propose une revue et une analyse de la littérature existante sur la quantification et la qualification des impacts des changements climatiques sur l'activité économique. Les données historiques reliant l'activité économique et les conditions climatiques sont rares et imprécises, tandis que la multiplicité des effets possibles et les rétroactions entre les effets économiques et sociaux dans les différents secteurs et pays rendent précaire tout exercice de chiffrage précis. Les évaluations disponibles s'accordent toutefois pour conclure, avec différentes méthodes d'estimation, que l'impact du changement climatique sur le PIB mondial serait significativement négatif, et réparti de façon inégale entre les différentes régions du monde. Cette étude montre enfin dans quelle mesure l'approche macroéconomique peut être complétée par des approches sectorielles et socio-économiques en permettant d'appréhender de manière plus précise les mécanismes sous-jacents aux dynamiques agrégées.

Abstract

Scientific consensus, including the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), is well established on the importance of climate change associated with increased anthropogenic greenhouse gas emissions. However, evaluating the economic impacts of these climate changes faces practical and theoretical difficulties. This work offers a review and analysis of the existing literature on the quantification and qualification of the impacts of climate change on economic activity. Historical data linking economic activity and climatic conditions are scarce and imprecise, while the multiplicity of possible effects and feedbacks between economic and social effects in different sectors and countries make any precise quantification exercise precarious. The available assessments agree, however, with different estimation methods, that the impact of climate change on world GDP would be significantly negative, and distributed unevenly among the different regions of the world. This study finally shows to what extent the macroeconomic approach can be supplemented by sectoral and socio-economic approaches by allowing a more precise understanding of the mechanisms underlying the aggregated dynamics.

Remerciements

Les auteurs remercient les adjoints et chef des bureaux Polsec4 « Climat, environnement, et agriculture », Macro2 « Politiques économiques et risques internationaux », Polsec3 « Économie des réseaux », Polsoc1 « Marché du travail et politiques de l'emploi », Finent3, « stabilité financière, comptabilité, gouvernance des entreprises » de la Direction générale du Trésor, l'ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique), les services de modélisation de l'OCDE, de la CCR (Caisse Centrale de Réassurance) et du CIRED (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, laboratoire de recherche du CNRS et de l'école des Ponts ParisTech) pour leur aide précieuse. Remerciement spécial à Heddie Moreno, étudiant à l'École d'économie de Paris qui a participé en tant que stagiaire aux travaux qui ont précédé ce document. Le contenu de l'analyse n'engage que les auteurs.

« Most everything we know tells us climate change is bad. Most everything we don't know tells us it's probably much worse »

Martin Weitzman

Introduction

Le climat se définit comme la distribution des différentes variables météorologiques sur une période de temps définie, à l'inverse de la « météo », réalisation ponctuelle de cette distribution. Le changement climatique désigne ainsi un changement durable de la moyenne et de la variabilité des propriétés du climat.

Le changement climatique en cours se caractérise en particulier par une hausse de la température moyenne à la surface des terres et des océans. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec ou IPCC en anglais¹), cette température moyenne à l'échelle du globe a d'ores et déjà augmenté de 1°C depuis l'ère préindustrielle² sous l'effet des émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines (IPCC, 2018). Sans mesure volontariste pour limiter ces émissions, le réchauffement devrait atteindre entre 3,7 et 4,8 °C à horizon 2100³.

Outre le réchauffement de l'atmosphère, le changement climatique se caractérise par d'autres modifications structurelles telles que l'évolution des niveaux des précipitations ou du taux d'humidité, avec de fortes disparités géographiques⁴. La hausse de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes – tempêtes (cyclones, typhons, etc.), inondations, sécheresses, épisodes de canicule, vagues de froid, etc. – est une autre composante importante du changement climatique⁵. Le changement climatique, *via* le réchauffement des océans (et donc leur dilatation) et la fonte des glaces, pourrait de plus engendrer une hausse significative du niveau de la mer. Les projections médianes prévoient une hausse comprise entre 70 et 150 cm à horizon 2100, mais des hausses beaucoup plus importantes ne sont pas à exclure⁶. On peut enfin citer d'autres effets de la hausse de concentration des GES et des changements climatiques, notamment sur les milieux naturels comme l'acidification des océans⁷ et les destructions et modifications de la biodiversité⁸.

Même si les effets géographiques devraient être très hétérogènes⁹, les changements climatiques devraient toucher l'ensemble des régions du monde, et mettre en danger de manière critique de nombreuses activités humaines (*cf.* annexe 1 pour une liste détaillée des risques les plus prégnants selon le Giec). Le changement climatique est donc une externalité mondiale dans ses causes et ses conséquences, et qui comporte de plus le risque majeur d'irréversibilité (Batten, 2018). Une fois émis, les gaz à effet de serre ont une durée de vie dans l'atmosphère de plusieurs dizaines ou centaines d'années voire plusieurs milliers pour certains d'entre eux. Cette dynamique de stock ainsi que les réactions des systèmes physiques pouvant intervenir avec retard

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change.

² La période utilisée généralement par le Giec comme période de référence est 1850-1900.

³ *Cf.* IPCC (2014). Les premiers résultats des travaux qui serviront au rapport du Giec de 2021 dans le cadre du sixième cycle d'évaluation, tendent à montrer que l'élévation des températures à niveau de politique inchangé sera plus importante que ne le prévoient les précédentes évaluations, de l'ordre de 1°C supplémentaire (Belcher, *et al.*, 2019).

⁴ La combinaison d'un fort taux d'humidité et d'une température élevée devient potentiellement mortelle pour l'homme. Aujourd'hui 30 % de la population mondiale est exposée à de telles conditions plus de vingt jours par an. En 2100, ce taux pourrait passer à environ 75 % (Mora, *et al.*, 2017).

⁵ Concernant les épisodes de forte chaleur, la France pourrait par exemple connaître des pics de température de l'ordre de 50°C voire 55°C dans certaines régions dans la deuxième moitié du 21^{ème} siècle (Bador, *et al.*, 2017).

⁶ À cet égard, on peut rappeler que la dernière fois que la température moyenne globale était au niveau actuel (environ 125000 ans), le niveau de la mer était 6 à 9 mètres plus haut qu'aujourd'hui (Hsiang & Kopp, 2018).

⁷ Cette acidification menace par exemple la survie des récifs coralliens qui abritent 25 % des espèces marines. Des températures de 1°C ou 2°C supérieures aux maximales normales pendant 3 à 4 semaines suffisent pour provoquer le blanchissement des coraux (IPCC, 2014).

⁸ Selon l'IPBES, 5 % des espèces seront en voie d'extinction si les températures augmentent de 2°C et 16 % si le réchauffement climatique atteint les 4,3°C (IPBES, 2019).

⁹ Certaines régions comme l'Afrique ou l'Asie du Sud et du Sud-Est sont plus particulièrement vulnérables au changement climatique, (IPCC, 2014).

(et brutalement (Lenton, *et al.*, 2019)), induisent de forts effets d'inertie et complexifient l'analyse de l'impact des GES.

Le présent travail propose une revue et une analyse de la littérature existante sur la quantification et la qualification des impacts des changements climatiques sur l'activité économique. Les phénomènes physiques associés au changement climatique joueraient *a priori* sur les dynamiques économiques de deux manières : directement *via* les dommages qu'ils engendreront et indirectement à travers les anticipations¹⁰ des agents sur le climat futur qui influencent leurs comportements économiques (Hsiang, 2016).

L'analyse des impacts économiques du changement climatique constitue un sujet relativement récent dans la littérature économique. Bien que la première étude s'intéressant aux impacts ait été publiée au milieu des années 1970¹¹, la réflexion académique sur le sujet n'a réellement commencé à se développer qu'à partir des années 1990 avec la construction des premiers modèles intégrés. Ces modèles intégrés avaient pour objectif de calculer le coût social du carbone¹², ce qui nécessitait de calculer les dommages liés au réchauffement climatique. En 2007, Nicholas Stern a mis en évidence l'importance des impacts économiques du changement climatique, dans un rapport¹³ qui a eu pour la première fois des échos en dehors de la sphère académique¹⁴. De nombreuses recherches se sont depuis concentrées sur cet enjeu, et le présent document de travail recense les résultats de ces différents travaux - notamment ceux effectués depuis le rapport Stern.

Le présent travail se concentre sur l'évaluation des impacts du changement climatique à politique inchangée, dans une optique de « coût de l'inaction ». Sauf mention contraire, les analyses produites dans ce document se situent ainsi dans le cadre d'une absence d'intervention politique supplémentaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'hypothèse climatique qui fonde cette étude est donc une prolongation des tendances d'émissions de gaz à effet de serre : il s'agit du scénario dit « à politique inchangée¹⁵ ».

Il convient enfin de souligner le caractère encore très fragile des résultats issus de la littérature scientifique et présentés ici. Si les impacts du changement climatique sont d'ores et déjà perceptibles, ils devraient prendre une ampleur considérable à l'échelle globale sur le moyen-long terme. Une évaluation économique de ces impacts repose donc par nature sur des exercices de projection qui nécessitent de faire des hypothèses sur l'évolution de l'activité économique et sur l'anticipation et l'adaptation spontanée des acteurs économiques au changement climatique. Aux incertitudes des modèles climatiques pour prévoir l'ampleur des phénomènes physiques s'ajoutent donc les incertitudes liées aux réponses des acteurs économiques (anticipations et mesures d'adaptation individuelles) et des pouvoirs publics (politiques publiques en faveur de l'adaptation). Ainsi, si des techniques économétriques récemment développées (*cf.* partie 1.1.3) permettent d'enrichir la littérature existante, les incertitudes autour des analyses, en particulier quantitatives, présentes dans cette littérature restent très importantes. Il est notamment probable que, face à un événement dont l'ampleur est sans précédent, de nombreux impacts ne soient pas anticipés. Il est donc important d'indiquer que les résultats contenus dans ce document présentent davantage de risque de sous-estimation que de surestimation.

L'approche macroéconomique des impacts du changement climatique développée dans la première partie vise à identifier les différentes manières d'évaluer les impacts, à recenser autant que possible les estimations existantes les plus représentatives, et à présenter les limites de ces estimations. La deuxième partie s'appuie sur des approches sectorielles et socio-économiques qui viennent compléter l'approche macroéconomique en permettant d'appréhender de manière plus précise les mécanismes sous-jacents aux dynamiques agrégées.

¹⁰ Rationnelles ou non.

¹¹ (D'Arge, 1975).

¹² Le coût social du carbone correspond à l'impact monétaire de l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂ (ou d'« équivalent-CO₂ » d'un autre GES). Son calcul est issu de l'égalisation du coût d'abattement marginal des technologies et du dommage marginal lié au changement climatique dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices.

¹³ (Stern, 2007).

¹⁴ *Cf.* par exemple J. Célestin-Urbain (2008), « Les conséquences économiques à long-terme du changement climatique », *Trésor-Éco* n° 30.

¹⁵ Le scénario le plus souvent retenu dans la littérature est le scénario RCP8.5 du Giec qui correspond à une prolongation des tendances d'émissions (*cf.* (IPCC, 2014)).

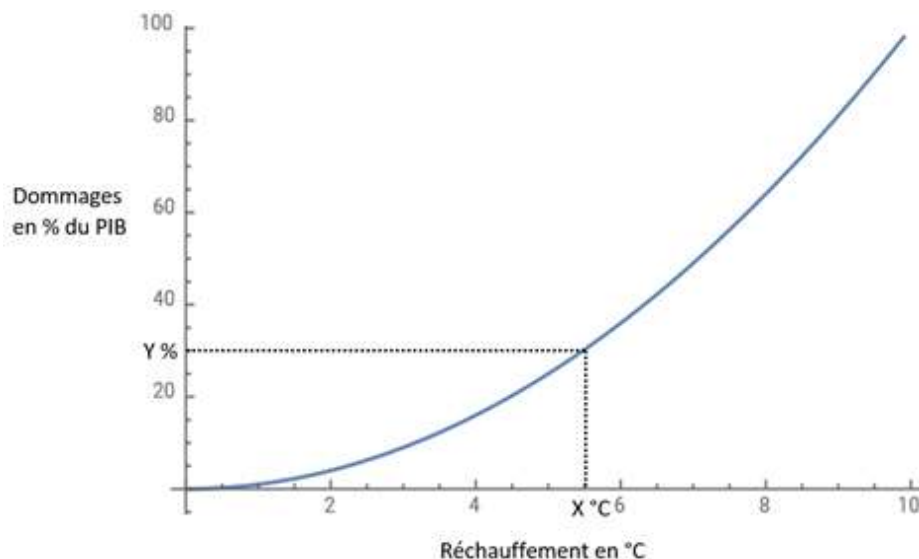
1. Revue des impacts macroéconomiques du changement climatique à l'échelle mondiale

1.1 Méthodologies d'évaluation de l'impact du changement climatique sur l'activité

1.1.1 La fonction de dommage : un outil synthétique d'évaluation

Compte tenu des incertitudes sur l'ampleur du réchauffement climatique, il semble souhaitable que les travaux d'estimation des impacts économiques couvrent différents scénarios de réchauffement possibles. La fonction de dommage est un outil intéressant à cet égard puisqu'elle établit une relation entre l'intensité des phénomènes physiques liés au changement climatique et le niveau des impacts sur l'activité économique (cf. graphique 1). Ce type de fonction a été introduit dans les années 1990 sous l'impulsion de William Nordhaus, dans le cadre du développement de nouveaux outils d'analyse économique des changements climatiques, dits d'évaluation intégrée (modèle d'évaluation intégrée – ou MEI¹⁶). Le concept de fonction de dommage sera mobilisé fréquemment dans ce travail, à la fois comme objet de la littérature académique et comme représentation synthétique des différentes estimations.

Graphique 1 : Exemple théorique d'une fonction de dommage



Note de lecture : La fonction de dommage présentée ici ne correspond pas à une véritable fonction de dommage issue de la littérature, il s'agit d'un exemple théorique destiné à illustrer la nature des fonctions de dommage. Une fonction de dommage exprime les dommages en % du niveau de la variable « endommagée » (ici le PIB) en fonction du réchauffement par rapport à une référence temporelle (généralement par rapport aux températures moyennes à la période préindustrielle). Ainsi, un réchauffement de X °C impliquera Y % de pertes de PIB par rapport à un scénario dans lequel le réchauffement n'aurait pas existé. Si Y est négatif, alors cela signifie que le réchauffement mondial bénéficie à l'économie.

Source : Auteurs.

¹⁶ William Nordhaus a obtenu le prix Nobel d'économie en 2018 pour ses travaux pionniers sur les liens entre économie et changement climatique, et en particulier pour la conception du premier modèle d'évaluation intégrée (MEI – en anglais *Integrated Assessment Model* – IAM) « DICE » (cf. Nordhaus, 1993). On peut citer également deux autres MEI très utilisés FUND (<http://www.fund-model.org/publications>) et PAGE (<https://www.climatecolab.org/wiki/PAGE>). L'utilisation des MEI repose en partie sur la calibration d'une fonction de dommage puisque celle-ci intervient dans l'optimisation « coût-bénéfice » du modèle qui permet de définir une trajectoire « optimale » d'émission de CO₂ associée à un signal-prix carbone qui permet de respecter cette trajectoire. Dans cette étude nous ne nous intéressons qu'à des scénarios dans lesquels les émissions ne sont pas contraintes. Ce ne sont donc pas les résultats des MEI que nous analysons mais plutôt les travaux permettant d'estimer leurs fonctions de dommage (et les travaux d'estimations des dommages en règle générale).

Les dommages sur l'activité sont généralement exprimés en points de PIB. L'intensité des changements climatiques est quant à elle le plus souvent résumée par le niveau de la hausse moyenne des températures à l'échelle mondiale ; on peut toutefois considérer aussi d'autres variables, comme la modification des précipitations ou l'élévation du niveau de la mer. Les dommages sur le PIB doivent s'interpréter par rapport à un scénario dans lequel il n'y aurait pas de changement climatique (ou dans lequel celui-ci n'aurait pas de conséquence économique)¹⁷.

La modélisation de cette fonction de dommage concentre la plupart des enjeux méthodologiques de l'estimation des impacts économiques du changement climatique. En effet, elle ne peut pas reposer sur une estimation économétrique simple, à partir de la corrélation empirique entre température et activité économique, en raison de plusieurs problèmes : insuffisance de profondeur historique des données, non-linéarité de la relation dommage-température, causalité inverse¹⁸, etc.

Trois principales familles d'approches proposées par la littérature peuvent contribuer à réduire la portée de ces problèmes et estimer une fonction de dommage : (i) les approches énumératives, reposant sur une agrégation d'estimations locales et sectorielles, couplées ou non avec des dires d'experts, (ii) les modèles d'équilibre général calculable, permettant d'intégrer à l'estimation un bouclage macroéconomique, et (iii) les estimations économétriques, utilisant des données en coupe ou, pour les travaux les plus récents, de panel. La suite de la première partie revient en détails sur ces trois principales approches et leurs résultats, en mentionnant également des approches complémentaires.

1.1.2 Approche énumérative

Les premiers travaux sur l'impact économique du changement climatique utilisaient une approche dite énumérative, aujourd'hui peu utilisée mais dont les résultats continuent à être inclus dans certains travaux de méta-analyse. L'approche énumérative consiste à rassembler des estimations empiriques effectuées au niveau sectoriel et régional afin de les agréger pour calibrer la fonction de dommage au niveau mondial tous secteurs confondus (Nordhaus & Boyer, 2000; Nordhaus, 2008).

Ces estimations empiriques sectorielles ou régionales se fondent sur un principe de conversion monétaire : elles utilisent les résultats sur les impacts physiques établis par les travaux de sciences physiques et assignent ensuite une valeur marchande à ces impacts. Par exemple, à partir des impacts estimés dans la littérature de la hausse de température sur le rendement du blé, cette approche permet d'en déduire l'impact monétaire sur la production de blé. Les résultats locaux et sectoriels sont ensuite agrégés à des échelles plus larges.

Les estimations n'existant pas pour toutes les régions et tous les secteurs, cette approche s'appuie largement sur l'extrapolation de résultats relatifs aux pays développés, pour lesquels il y a un meilleur accès aux données, pour calibrer les dommages à l'échelle globale. Cela nécessite de faire des hypothèses fortes qui négligent non seulement la plupart des effets de non linéarité et de changement d'échelle, mais négligent également toutes les différences entre pays. La conversion monétaire est par ailleurs entachée d'incertitudes, notamment en ce qui concerne les impacts indirects (impact sur le PIB des dommages causés sur la santé par exemple).

Cette méthodologie était employée pour calibrer la fonction de dommage des premiers MEI dont l'objectif final n'était pas de calculer des dommages mais de définir une trajectoire « optimale » d'émissions de GES compte tenu des dommages induits par ces émissions et des coûts pour les réduire. Si le caractère relativement « grossier » de cette méthode peut étonner, il convient de l'interpréter en la situant dans un contexte où très peu d'évaluations de dommage du changement climatique étaient disponibles au début des années 1990.

¹⁷ Pour certaines méthodes d'estimation, cela peut impliquer de reconstituer un scénario sans impact du changement climatique (cf. partie 1.1.4).

¹⁸ Le biais de simultanéité ou de causalité inverse apparaît lorsque l'estimation de la causalité de x sur y, ne tient pas compte des effets de causalité inverse de y sur x. Ce problème apparaît pour la relation entre climat et économie puisque le climat a un impact sur l'économie à travers ses différents impacts physiques énumérés en introduction et dans l'autre sens la cause anthropique du réchauffement climatique liée aux émissions de GES est établie scientifiquement.

Enfin, la calibration d'une fonction dommage sur la base de ce type de méthode est particulièrement difficile pour des valeurs de température élevées, pour lesquelles l'ensemble des méthodologies utilisées donnent des résultats peu robustes par manque de repère empirique. Estimer une fonction de dommage suppose alors de faire une hypothèse sur sa forme (linéaire, quadratique, etc.). Nordhaus, et la plupart des modélisateurs qui ont suivi, ont eu recours dans un premier temps à des formes quadratiques en extrapolant les dommages marginaux estimés pour les températures élevées¹⁹. D'autres études (Nordhaus, 1994; Howard & Sylvan, 2015) procèdent à des entretiens d'experts pour calibrer la fonction de dommage, notamment pour les hausses de température très élevées (au-delà de 3°C) pour lesquelles il y a par définition peu de données.

Depuis, des auteurs comme Weitzman ont critiqué le recours à une forme quadratique, qui sous-estimerait les dommages à des hauts niveaux de températures et ne rendrait pas compte en particulier de l'impact important des événements extrêmes dont la fréquence et l'intensité augmentent avec la température. Weitzman propose ainsi à la place une fonction polynomiale de degré beaucoup plus élevé (Weitzman, 2012)²⁰. Cette approche nécessite une évaluation des dommages aux températures très élevées (6 °C et 12 °C par exemple²¹), qui permet ensuite la calibration de la forme de la fonction à partir de l'hypothèse sur le degré du polynôme²². Par exemple Weitzman fixe le seuil de hausse de température de 15 °C comme étant incompatible avec toute activité économique (~100 % de perte de PIB)²³ alors que la forme fonctionnelle déterminée par Nordhaus (*cf. supra*) ne prévoit des pertes que de 26 % du PIB à ce niveau de réchauffement.

1.1.3 Les modèles d'équilibre général calculable (MEGC) permettent un bouclage macroéconomique des impacts

Les MEGC proposent une représentation dynamique du système économique d'un pays ou de plusieurs pays en interaction, chaque système ayant une déclinaison sectorielle²⁴ et des agents représentatifs (consommateurs, Etat, producteurs) optimisant leurs décisions économiques. En particulier, l'optimisation des producteurs consiste en un arbitrage entre différents facteurs de production (travail, capital, terre, énergie, etc.) en fonction de l'évolution des prix relatifs de ces facteurs. Les MEGC permettent d'estimer l'impact du changement climatique par différence entre les résultats donnés par le modèle calibré sur le scénario tendanciel et les résultats donnés par le modèle dont les paramètres ont été ré-estimés en fonction d'un scénario de réchauffement donné (*cf. annexe 2* pour des exemples d'impacts modélisés à l'aide d'un MEGC dans le cadre du rapport de l'OCDE de 2016²⁵).

La plupart des travaux s'appuyant sur des MEGC distinguent des effets directs et des effets indirects *via* les effets d'ajustements entre secteurs ou entre pays.

Les effets directs peuvent apparaître de deux manières dans ces modèles (Szewczyk, *et al.*, 2018) :

- un choc de productivité, comme dans le secteur agricole par exemple, où le changement climatique impliquerait une réduction de la productivité de certains types de culture ;
- une destruction de capital, avec par exemple une augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles ou la montée du niveau des océans qui risquent d'endommager le capital physique (bâtiments et infrastructures de transport notamment) ;

¹⁹À titre d'illustration, la dernière version du MEI conçu par Nordhaus (modèle DICE) contient la fonction de dommage suivante : $D(\Delta T) = 1 - \theta_1 \Delta T - \theta_2 \Delta T^2$, avec D le niveau des dommages en % PIB, ΔT le niveau de réchauffement, θ_1 et θ_2 des paramètres à calibrer par les modélisateurs (Nordhaus, 2016). L'extrapolation aux températures élevées est commune à l'ensemble des méthodes de calibration.

²⁰ À titre d'illustration, la forme fonctionnelle de Weitzman conduit à un impact deux fois plus important à l'horizon 2100 (en condition *business as usual*) par rapport à celle de Nordhaus selon le rapport de l'OCDE (2016).

²¹ Weitzman, (2009) et Weitzman (2012), *Ibid.*

²² Weitzman (2012), *Ibid.*

²³ Weitzman s'appuie sur l'approche dite « scientifique » qui consiste à évaluer les températures à partir desquelles la terre deviendrait inhabitable pour les humains – *cf.* (Howard & Sterner, 2014).

²⁴ Par exemple le modèle ENV-Linkage de l'OCDE représente l'économie mondiale partagée en 25 pays ou régions, avec 35 secteurs économiques modélisés pour chaque entité géographique.

²⁵ OCDE (2016), « Les conséquences économiques du changement climatique », *Éditions OCDE*.

À ces effets s'ajoutent des effets indirects ou d'entraînement²⁶ :

- des changements de consommation, soit *via* l'ajustement des prix relatifs des biens suite aux chocs climatiques, soit *via* une déformation de l'arbitrage investissement-consommation due à la plus forte dégradation du capital (par exemple, les coûts de la réparation des bâtiments réduiraient le revenu disponible des ménages et donc leur consommation) ; les MEGC prennent également souvent en compte les impacts sur les dépenses de santé et la consommation d'énergie ;
- impacts intersectoriels puisque les impacts du changement climatique sur certains secteurs seraient liés à des chocs sur d'autres secteurs (par exemple un choc climatique sur le secteur agricole aurait des répercussions sur la nutrition et la santé) ;
- impacts interrégionaux²⁷ puisqu'un choc climatique sur la production d'un pays et/ou d'une région aurait un effet sur ses importations et exportations.

Les MEGC simulent avec plus ou moins de détail ces différents effets. Si les MEGC sont ainsi plus complets, ils présentent trois limites principales. Tout d'abord, il n'est pas toujours possible de fonder empiriquement les paramétrages lui permettant de modéliser l'ensemble des dommages simulés. Pour certains effets (par exemple la réaction des consommateurs) peu de données existent pour permettre une calibration robuste. Par ailleurs, l'horizon possible de simulation constitue une limite importante de ce type de travaux. En effet, plus l'horizon s'éloigne moins la structure de la nomenclature sectorielle et la valeur des paramètres des équations du modèle sont fiables. Il existe ainsi pour ce type d'exercice un arbitrage à faire entre le niveau de détail de la modélisation et l'horizon de simulation. Enfin, les modèles EGC ne permettent pas de prendre en compte les coûts de transition liés à l'adaptation²⁸. Ils ne modélisent que les adaptations de marché qui ne font pas intervenir de coûts (adaptations de type 1 *cf.* encadré 1). Les adaptations de court terme et de long terme qui nécessitent des investissements ne peuvent être simulées dans ces modèles dans la mesure où les agents optimisent leur comportement par rapport à un ensemble de contraintes et de signaux prix à la période présente sans anticipation sur le futur (pas d'anticipations rationnelles ou adaptatives).

Encadré 1 : Le rôle de l'adaptation dans l'estimation des dommages du changement climatique

Les impacts du changement climatique dépendent fortement de la manière dont les agents économiques vont individuellement et collectivement²⁹ anticiper le changement et s'y adapter. Ainsi, une des principales critiques faites aux premières fonctions de dommages est l'absence de prise en compte des différents mécanismes d'adaptation³⁰. À noter que cette prise en compte comporte des effets contradictoires sur les impacts estimés puisque l'adaptation permet de réduire les dommages mais nécessite des investissements coûteux (Fisher-Vanden, *et al.*, 2013).

La prise en compte satisfaisante de l'ensemble des comportements d'adaptation est difficile tant avec des méthodes de calibration qu'avec des méthodes empiriques. Selon Fisher-Vanden et Wing (2013), les décisions et possibilités d'adaptation sont très variées en fonction des secteurs et peuvent être classées selon trois types :

- **Type I** : ce type recouvre les réactions passives d'équilibre général qui dépendent exclusivement de l'évolution des prix et des effets de substitutions entre les différents marchés, comme par exemple la modification des dépenses de chauffages et de climatisation ou des choix de destinations touristiques, etc. Les modèles EGC reproduisent ces mécanismes d'adaptation sans coût d'ajustement.
- **Type II** : l'adaptation réactive qui comprend les réponses de certains secteurs d'activité face aux premières manifestations des impacts physiques du changement climatique. On peut penser à la substitution de variétés de plantations pour améliorer la résistance à la chaleur ou à la construction

²⁶ OCDE (2016), *Ibid.*

²⁷ Il existe peu d'études empiriques sur ces impacts interrégionaux qui sont particulièrement délicats à identifier, c'est pourquoi ils ne seront pas analysés directement dans le cadre de cette étude.

²⁸ La modélisation de l'adaptation dans un EGC n'implique pas de coûts puisqu'elle dépend d'élasticité de substitution.

²⁹ Pour mémoire, nous ne nous intéressons dans cette étude qu'aux anticipations individuelles ou collectives spontanées, c'est-à-dire qui ne résultent pas d'une politique publique.

³⁰ Auffhammer (2018), *Ibid.*

d'infrastructures côtières contre la montée des eaux, etc.³¹ Cette adaptation peut se traduire par un coût d'ajustement important (investissements, travaux, etc.) dont l'estimation précise est délicate.

- **Type III** : l'adaptation préventive, qui nécessite des investissements proactifs en vue de limiter les effets du changement climatique sur le long terme (systèmes d'assurances, développement de capacité de productions plus flexibles, investissements anticipant la multiplication des événements extrêmes etc.) et dont le coût est également élevé. Le taux d'actualisation joue un rôle ici dans la prise en compte de ce type d'adaptation individuelle dans les modèles macroéconomiques³², bien que son effet soit minime³³. En effet, il s'agit bien de comparer à un niveau individuel les coûts de l'adaptation aujourd'hui par rapport aux dommages évités dans le futur. Cela revient à faire une analyse coût-bénéfices au niveau individuel. Plus le taux d'actualisation sera faible, plus l'adaptation de Type III sera importante et inversement.

La modélisation du comportement des agents économiques dans les MEGC n'intégrant pas les anticipations rationnelles ou adaptatives, ces modèles ne peuvent reproduire que les adaptations de type I dans leurs mécanismes.

1.1.4 Estimations statistiques et économétriques : renforcement des fondements empiriques

Les premières approches économétriques utilisées pour calibrer les fonctions de dommages recouraient à des données en coupe (Mendelsohn, *et al.*, 1994). Cette méthode permet théoriquement d'identifier les effets de long terme du changement climatique en supposant qu'on peut inférer à partir des différences de climats observées entre des régions (*analyse géographique*) les effets d'une hausse de température au sein d'une même région (*analyse temporelle*)³⁴. Cette approche suppose de considérer que les différences de comportements économiques (investissements, méthodes de production, etc.) entre deux régions sont le fruit d'une optimisation qui s'est effectuée en fonction du climat, et qui représentent un équilibre stabilisé de long terme.

Cependant, cette méthode comporte plusieurs problèmes. Tout d'abord, elle néglige les coûts de transition, puisqu'elle compare deux régions *a priori* dans un état stationnaire vis-à-vis de l'adaptation aux conditions climatiques. Or les coûts de transition de court-moyen terme pour s'adapter au changement climatique sont probablement significatifs³⁵. Cette méthode sous-estimerait donc les impacts en ignorant les coûts d'adaptation et en ne considérant que les équilibres de long terme. D'autre part, cette méthode comporte le risque que les résultats soient en partie biaisés par une corrélation fallacieuse entre la variable climatique et des variables inobservables non prises en compte par le modèle tel que l'environnement institutionnel par exemple (Acemoglu, *et al.*, 2002; Rodrick, *et al.*, 2004) et qui ont également un impact sur la production économique³⁶.

Afin de dépasser les difficultés liées à l'analyse des données en coupe, les estimations des impacts économiques du réchauffement climatique à partir des données de panel se sont multipliées ces dernières années³⁷, permettant de cumuler observations géographiques et temporelles. Cette approche suppose qu'un effet sur le PIB d'une variation de court terme de la météo est une bonne approximation de l'effet de long terme du changement climatique. Cette hypothèse est toutefois fragile, car les comportements d'adaptation de court terme qui sont captés par ce type d'estimation ne sont pas forcément tous répliquables à long terme. Par exemple, les systèmes d'irrigation, qui peuvent être des moyens d'adaptation à court terme, sont vulnérables au changement climatique à long terme. À l'inverse, les possibilités d'adaptation de long terme,

³¹ Ce type d'adaptation nécessite une certaine forme d'anticipation (sur la répétition des événements climatiques extrêmes par exemple), et ne peut donc pas être capté dans les modèles EGC.

³² Notamment dans les modèles MEI comme AD-DICE de De Bruin *et al.* (2009) par exemple.

³³ De Bruin *et al.* (2009), *Ibid.*

³⁴ (Moore & Kolstad, 2019).

³⁵ Cf. par exemple Mejia, *et al.*, (2018). Les auteurs de cette étude estiment que si les pays à faible revenu avaient une structure économique tertiaisée similaire à celle des pays développés, cela réduirait leurs coûts du changement climatique de 30 %.

³⁶ Cf. Dell, *et al.* (2014), Auffhammer (2018) et Kolstad et Moore (2019), *Ibid.*

³⁷ Voir Batten (2018), Carleton et Hsiang (2016) et Dell *et al.* (2014), *Ibid.*

telles que les modifications des méthodes de production ou des investissements en infrastructures, ne sont pas prises en compte par défaut dans ces estimations³⁸.

À travers le développement de l'usage des données de panel, de nombreuses approches hybrides se sont développées afin d'affiner l'identification empirique de l'impact climatique sur l'économie³⁹. Celles-ci tentent d'exploiter la richesse des données de panel en combinant l'hétérogénéité géographique des effets marginaux (Deryugina & Hsiang, 2017), les variations météorologiques d'une année sur l'autre⁴⁰ et les différences climatiques de moyen-terme et long-terme (Dell, *et al.*, 2012). Ainsi, certaines études tentent de décomposer directement dans leur régression les effets climatiques de court et de long terme (Moore & Lobell, 2015). La comparaison de ces différents types de variation permet notamment de donner des indications sur les possibilités d'adaptation et d'estimer de manière plus pertinente les impacts du changement climatique.

1.2 Synthèse des résultats recensés dans la littérature

Avant d'évoquer les résultats des estimations d'impact, il convient de noter que l'utilisation des méta-analyses s'est généralisée depuis quelques années⁴¹. Cette méthode ne peut être comparée directement avec les précédentes puisqu'elle se fonde sur les résultats des autres catégories d'études.

Howard et Sterner (2017) ont relevé un biais dans la méthodologie de la plupart des méta-analyses qui avait tendance à sous-estimer le niveau de dommages. Notamment, certains estimateurs utilisés dans les méta-analyses reposaient sur des mêmes jeux de données (biais de duplication). Cela avait pour conséquence de surpondérer les résultats des auteurs ayant calibré les premières fonctions de dommage⁴² ou utilisant une approche énumérative⁴³. Par ailleurs, selon plusieurs études⁴⁴, les résultats des analyses économétriques récentes (notamment ceux issus des données de panel) justifieraient une mise à jour profonde des méta-analyses et fonctions de dommages. Howard et Sterner (2017) ont conduit leur propre méta-analyse en corrigeant ces biais. Les études qu'ils ont retenues constituent une large part de celles qui ont servi pour la présente revue de littérature (*cf.* annexe 2 pour plus de détails).

Il convient en outre de noter que d'autres analyses d'impact du changement climatique sur l'activité ont été développées, notamment dans le secteur de la réassurance, mais n'ont pas d'application directe pour l'analyse macroéconomique (*cf.* encadré 2).

Bien que visant une bonne représentativité, la présente revue de littérature n'a pas pour ambition d'être exhaustive. Il est par ailleurs important de rappeler que des effets pouvant aggraver très significativement les dommages, ne sont pas pris en compte, ou de manière peu convaincante, dans les estimations recensées (*cf.* partie 1.3).

³⁸ Pour pallier ces problèmes, certains modèles intègrent deux variables climatiques, dont une sous forme de fonction quadratique, permettant de capter à la fois les variations climatiques dans le temps, et entre régions. Cette spécification non linéaire capte ainsi potentiellement plus efficacement les phénomènes d'adaptation de court et long terme (*cf.* Auffhammer (2018) et Kolstad et Moore (2019) pour une revue de littérature sur ces questions).

³⁹ Kolstad et Moore (2019), *Ibid.*

⁴⁰ Par exemple Dell *et al.* (2014), *Ibid.*

⁴¹ Richard Tol a été le premier à utiliser cette méthode pour son modèle FUND dans Tol (2009). Nordhaus a utilisé également une méta-analyse au niveau global pour calibrer la fonction de dommage de DICE-2013. Voir (Nordhaus & Sztorc, 2013). Disponible à l'adresse : <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/documents/Dicemanualfull.pdf>

⁴² Certains auteurs étaient cités plusieurs fois dans certaines méta-analyses. Par exemple, Nordhaus (2013) citait cinq de ses propres études sur treize utilisées dans sa méta-analyse. Maddison et Tol étaient aussi cités plusieurs fois que ce soit dans les méta-analyses de Nordhaus (2013) ou Tol (2014).

⁴³ Voir Howard et Sterner (2014) et Howard et Sterner (2017), *Ibid.* pour le détail.

⁴⁴ Par exemple Diaz et Moore (2017), ou Howard et Sterner (2017), *Ibid.*, ou Ackerman et Stanton (2012).

Encadré 2 : Modèles de simulation des catastrophes naturelles utilisés par les réassureurs

Les réassureurs tels que Swiss RE, Munich RE ou la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) ont développé des modèles de simulation qui leur permettent d'évaluer l'impact sur les biens assurés de la multiplication des catastrophes naturelles due au changement climatique (sécheresses, inondations, submersions, etc.). Ces travaux ont un niveau de précision géographique très détaillé pour décrire les impacts physiques. Par exemple, le modèle ARPEGE de Météo France utilisé par la CCR dans son rapport de 2018⁴⁵ a une résolution spatiale de 20km. Pour ces travaux, Météo France a fourni 400 jeux de données climatiques (précipitations, pression atmosphérique, etc.) pour l'année 2050 sur la base du scénario RCP8.5 du Giec (scénario « *business as usual* »). La CCR a traité les données de ces simulations pour en déduire les dommages sur les biens assurés. Le fait de multiplier les simulations pour une même année alourdit considérablement les calculs⁴⁶ mais permet une meilleure prise en compte des scénarios extrêmes. Ces scénarios ont certes une probabilité d'occurrence plus faible mais ne doivent pas être écartés des analyses servant à la prise de décision.

Si ces travaux n'ont pas une application directe pour l'analyse de l'impact macroéconomique du changement climatique (ils ne tiennent compte que des risques liés aux catastrophes naturelles et des impacts liés aux dommages sur les biens assurés), ils sont très utiles pour améliorer les connaissances et la précision des évaluations des impacts économiques du changement climatique.

1.2.1 Parmi les études recensées, la fourchette d'estimation des dommages est comprise entre 3,6 % et 30 % du PIB mondial à l'horizon 2100

Selon les estimations recensées pour cette étude, les impacts macroéconomiques du changement climatique au niveau mondial seraient systématiquement négatifs, mais d'une ampleur variable. Ainsi, si certaines méthodes estiment jusqu'à un impact de -15 % de PIB en 2050 (date à laquelle le réchauffement devrait avoir atteint de l'ordre de 2,5 °C selon le Giec⁴⁷) et -30 % de PIB en 2100 (date à laquelle le réchauffement devrait avoir atteint 3,7 à 4,8° C selon le Giec⁴⁸) dans un cadre « à politique inchangée », d'autres suggèrent des impacts plus limités (-4 % en 2100 et même un impact nul en 2050). À noter que les études les plus récentes ont tendance à produire des estimations de dommages supérieures (cf. graphique 2), les dommages très faibles se faisant notamment plus rares.

Pour un réchauffement jusqu'à 1,5°C, les impacts du changement climatique recensés illustrent l'incertitude aux faibles niveaux de réchauffement. Ainsi, certaines études évaluent des bénéfices jusqu'à +1 % du PIB mondial quand d'autres travaux estiment des pertes allant jusqu'à -7 % du PIB mondial pour un réchauffement de 1 °C. Ces différences illustrent bien l'incertitude sur le niveau de réchauffement à partir duquel l'effet devient négatif. Pour une augmentation des températures comprise entre 2 C et 3°C, les impacts recensés deviennent négatifs ou nuls, jusqu'à -15 % du PIB mondial. En outre, il apparaît clairement que l'incertitude des estimations augmente avec le niveau de réchauffement. À partir de 3 °C d'augmentation, les intervalles d'impacts deviennent en effet particulièrement larges. Ainsi, les pertes de PIB mondial recensées sont comprises entre 0 et -30 % pour des réchauffements compris entre 3 et 5 °C et entre -4 % et -50 % pour les réchauffements compris entre 5 °C et 6 °C. L'annexe 3 présente les résultats des estimations recensées par type de méthodologie sous forme de tableau. Les différences de résultats peuvent s'expliquer en partie par les particularités de chaque méthodologie (cf. annexe 4) : prises en compte de différents types d'impacts, prise en compte de différents types d'adaptation, etc.

À noter que les résultats présentés dans cette section ne portent que sur les effets directs du changement climatique et que les risques associés à ces estimations sont bien davantage à la hausse qu'à la baisse, et sont potentiellement massifs – il n'est notamment pas exclu que les effets indirects dépassent largement les effets directs.

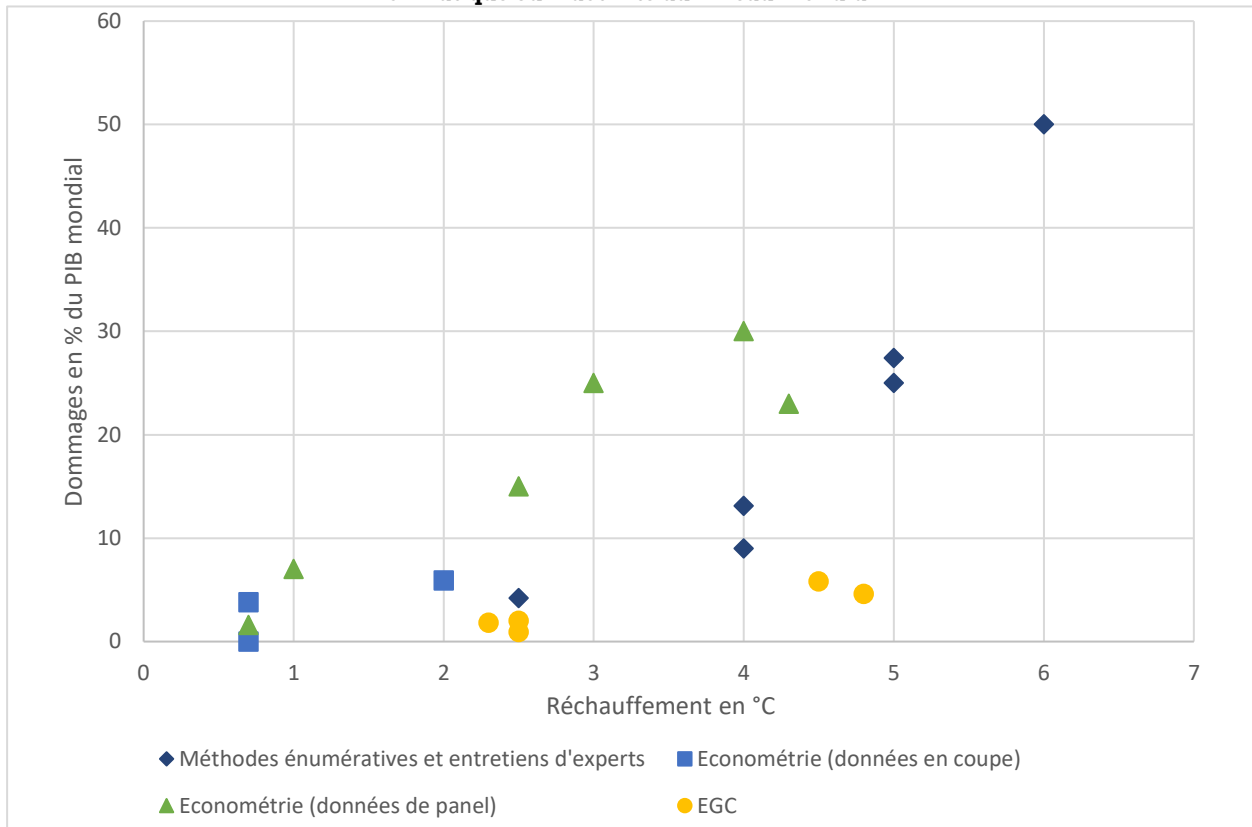
⁴⁵ CCR (2018) « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 ».

⁴⁶ Un super ordinateur de Météo France a tourné pendant près de six mois pour réaliser ces simulations.

⁴⁷ IPCC, 2014.

⁴⁸ IPCC, 2014.

Graphique 2 : Estimations les plus récentes dans la littérature des dommages quantifiables du changement climatique sur l'activité au niveau mondial



Note de lecture : Chaque point représente les estimateurs de dommages d'une étude en fonction du réchauffement et de la méthodologie employée. Par exemple, un carré bleu représente l'estimation de l'impact économique du changement climatique en pourcentage du niveau de PIB en fonction du réchauffement moyen en °C au niveau mondial d'une étude économétrique utilisant des données en coupe. Attention ce graphique ne prétend pas à l'exhaustivité et il faut noter que de nombreux effets du changement climatique ne sont pas évalués dans ces estimations (cf. partie 1.3).

Sources : Les résultats représentés sur ce graphique proviennent d'études identifiées par Howard et Sterner (2017), d'autres études identifiées par les auteurs (en particulier postérieures à Howard et Sterner⁴⁹), et d'extrapolation à partir des fonctions de dommage trouvées dans l'ensemble des études citées. Les références et les détails sur la méthodologie peuvent être trouvés en annexe 3.

Encadré 2 : Hétérogénéité géographique des impacts et cas de la France

Les évaluations des impacts au niveau mondial masquent de très fortes hétérogénéités régionales. Dans la mesure où les épisodes de très fortes chaleur (>30 °C) sont considérés comme les événements climatiques occasionnant le plus de dommages économiques, les pays soumis actuellement aux climats les plus chauds sont mécaniquement les plus vulnérables (Hsiang, *et al.*, 2018). Ces pays sont par ailleurs également ceux dont l'économie repose le plus sur le secteur agricole lui-même particulièrement soumis au risque climatique (cf. partie 2.1.1), et ceux dont le niveau de développement économique – et donc de ressources épargnées et d'institutions de qualité – peut le moins jouer un rôle d'amortisseur des chocs climatiques⁵⁰ (cf. graphique 3). Les projections de l'OCDE⁵¹ confirment l'hétérogénéité des impacts avec des pertes de consommation par habitant de l'ordre de 4 % à horizon 2060 pour l'Afrique subsaharienne, l'Asie du Sud et du Sud-Est, le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, de 2 % pour l'Amérique latine et comprises entre 0 et 1 % pour les zones Amérique⁵², Europe⁵³ et Pacifique⁵⁴ de l'OCDE.

⁴⁹ Par exemple, Burke *et al.* (2018).

⁵⁰ Burke et Tanutama (2019).

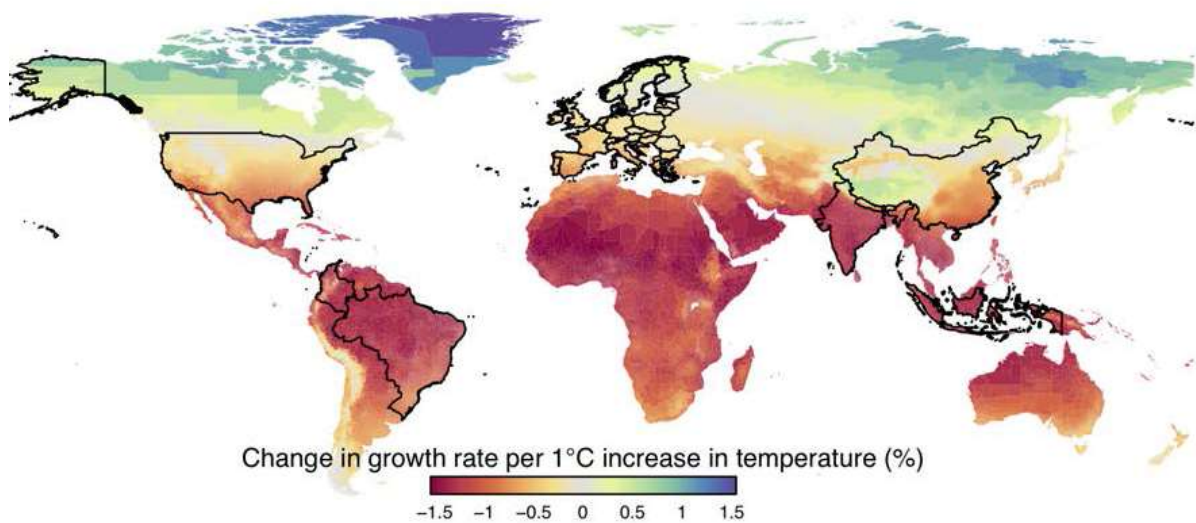
⁵¹ OCDE (2016), *Ibid.*

⁵² Canada, Chili, Mexique, États-Unis.

⁵³ Pays de l'UE membres de l'OCDE + Islande, Norvège, Suisse, Turquie et Israël.

⁵⁴ Australie, Nouvelle-Zélande, Corée du Sud, Japon.

Graphique 3 : Hétérogénéité de l'impact du réchauffement climatique sur le taux de croissance du PIB



Source : Burke et Tanumata (2019).

Le France, ayant un climat tempéré, fait partie des pays pour lesquels le signe de l'impact du changement climatique est incertain dans les estimations. En effet, dans un scénario *business as usual*, les impacts sur le PIB français recensés dans la littérature par les auteurs sont compris entre -2 % et +5 % en 2050 et entre -6 % et +10 % de PIB en 2100 (cf. annexe 5 pour plus de détails).

Il est important de préciser que, à l'instar de ces résultats pour la France, les techniques d'estimations à l'échelle nationale ne captent que les dommages directs du changement climatique. Il serait très imprudent de considérer que dans les conditions d'un réchauffement global très élevé certains pays pourraient ne connaître que de faibles dommages, voire bénéficier du changement climatique. En effet, les dommages très élevés que subiront l'immense majorité des pays dans un tel scénario auront des répercussions globales notamment *via* le canal du commerce extérieur et les risques de propagation de l'instabilité politique (voir la seconde partie). L'épisode des inondations de 2011 en Thaïlande qui a déstabilisé l'industrie automobile de la région (y compris jusqu'au Japon) et qui a conduit à une pénurie mondiale de disques durs pendant plusieurs mois montre que les effets indirects du changement climatique ne peuvent être considérés de second ordre (Haraguchi & Lall, 2015).

1.2.2 Différences de résultats selon les méthodologies

Les approches énumératives, qui sont souvent limitées par l'absence de prise en compte de nombreux secteurs, ont tendance à additionner les effets pour certains pays puis à les extrapoler au reste du monde. Cette approche a donc tendance à donner des résultats biaisés au niveau global à cause du manque de secteurs et pays pris en compte. En règle générale, on s'attend à une sous-estimation des dommages puisque l'extrapolation est faite à partir de résultats estimés pour les pays développés⁵⁵ qui a priori seront moins touchés que les pays en développement (ceux-ci étant généralement situés géographiquement dans des régions plus chaudes et donc plus vulnérables à une hausse additionnelle de la température⁵⁶, voir encadré 2).

Les résultats des MEGC sont d'ampleur plutôt faible par rapport aux autres méthodologies. Cela s'explique par la modélisation des adaptations de marchés sans la prise en compte des coûts de transitions et de certains impacts (notamment événements extrêmes et points de basculement – cf. partie 1.3). Les résultats recensés de cette modélisation vont de -0,2 % à -5,8 % de perte de PIB mondial pour des scénarios de

⁵⁵ Par exemple Fankhauser (1995) sur l'impact économique de la montée des eaux dans les pays de l'OCDE ou Nordhaus (1993) extrapolant ses résultats sur les États-Unis.

⁵⁶ Cf. par exemple International Monetary Fund. (2017).

réchauffement compris entre 1,5 et 4,8 °C (cf. annexe 3). Les différentes études donnent des résultats plutôt uniformes : cela s'explique par le fait que les rares MEGC qui ont été utilisés pour calculer des impacts⁵⁷ ont des calibrations très similaires⁵⁸. En outre, bien qu'un MEGC permette de prendre en compte de nombreux types d'effets⁵⁹ marchands, ils ne tiennent pas compte des impacts non marchands et sociaux ou des coûts d'adaptation⁶⁰ ce qui participe à la sous-estimation des dommages. Enfin, les dommages liés aux catastrophes naturelles, qui peuvent fortement augmenter le niveau des dommages, sont moins pris en compte dans les EGC actuels que dans les autres approches⁶¹.

L'utilisation des données de panel apparaît donner des dommages sur le PIB significativement plus élevés que les autres méthodologies⁶², même à de faibles niveaux de réchauffement (Burke, *et al.*, 2015). Cela pourrait s'expliquer en partie par la spécification des modèles en panel, qui permet d'étudier les dynamiques climatiques de court terme⁶³ et ainsi de capter plus finement (i) les coûts d'adaptation de court terme⁶⁴ (qui ne sont pas captés par la plupart des autres méthodologies – cf. partie 1.1) et (ii) les impacts sur le taux de croissance du PIB (et non directement sur le niveau de PIB comme avec les autres méthodologies). Concernant ce dernier point, un nombre croissant de travaux trouvent un impact à la baisse significatif sur le taux de croissance⁶⁵, induisant un niveau de PIB de long terme inférieur par rapport aux méthodologies ne captant pas les effets sur le taux de croissance (Moore & Diaz, 2015). Burke *et al.* (2015) par exemple expliquent ce résultat par (i) l'impact négatif que pourraient avoir les chocs climatiques sur l'investissement, nuisant ainsi à la productivité future, (ii) l'éviction d'une partie des investissements en capital productif par les investissements visant à s'adapter au changement climatique, et (iii) l'instabilité politique et sociale néfaste à la croissance qui pourrait résulter en des chocs économiques dus au changement climatique (particulièrement vrai dans les pays en développement)⁶⁶.

Les résultats des méta-analyses concentrent les mêmes débats de formalisation. Celles-ci ne peuvent être comparées directement aux précédentes puisqu'elles utilisent directement leurs résultats pour arriver à une fonction de dommage, et c'est pourquoi elles n'ont pas été intégrées dans le graphique 2. Les résultats dépendent ainsi fortement des analyses choisies par la méta-analyse et par le poids donné à chacune des méthodologies précisées précédemment.

1.3 Limites générales à l'estimation des impacts économiques du changement climatique

Il convient de rappeler que les résultats des différentes méthodologies évoquées ici sont soumis à une très forte incertitude (Van Den Bergh & Botzen, 2015)⁶⁷, notamment due à la non linéarité des dynamiques en jeu. Ces incertitudes apparaissent ainsi en particulier lors de la calibration de la forme de non linéarité dans les modèles de projection climatiques et économiques. Quatre types d'incertitudes peuvent être identifiées : incertitudes liées à la dynamique du système climatique (1.3.1) ; incertitudes liées à la dynamique des impacts économiques (1.3.2) ; incertitudes liées à la nature de la mesure des impacts économiques (effets directs sur le PIB – 1.3.3) ; et incertitudes liées aux scénarios extrêmes (1.3.4). Il faut noter toutefois que ces incertitudes ne sont pas nécessairement symétriques, mais représentent généralement un risque de sous-estimation des impacts réels.

⁵⁷ Bosello, *et al.* (2012), Roson & van der Mensbrugghe, (2012), OCDE (2016), Ciscar, *et al.* (2014), Szewczyk, *et al.* (2018).

⁵⁸ ENV-Linkage dans OCDE (2016) et ICES (2012) ont par exemple de nombreuses calibrations en commun.

⁵⁹ Voir méthodologie *supra*.

⁶⁰ La modélisation de l'adaptation dans un EGC n'implique pas de coûts supplémentaires car les ajustements (comme la substitution entre facteurs de production) se font instantanément et sans coût.

⁶¹ OCDE (2016), *Ibid.*

⁶² Howard et Sterner (2017), *Ibid.*

⁶³ Variations interannuelles.

⁶⁴ Certains auteurs ont développé des techniques permettant aux modèles en panel de capter en même temps les coûts d'adaptation de long terme (cf. Auffhammer (2018) et Kolstad et Moore (2019)).

⁶⁵ (Burke, *et al.* 2015) ou (Dell, *et al.* 2012).

⁶⁶ Pour une explication détaillée de l'ensemble des possibles canaux de transmission entre changement climatique et taux de croissance du PIB, voir (Howard, 2014) ou (Stern, 2013).

⁶⁷ Voir aussi les intervalles d'incertitudes des résultats dans les nombreuses études : Stern (2007), OCDE (2016), etc.

1.3.1 L'incertitude liée à la dynamique climatique

Le lien entre niveau de réchauffement et horizon temporel peut être fait à l'aide des travaux du Giec, qui proposent un scénario tendanciel (ou « à politique inchangée ») avec réchauffement autour de 2,5 °C à l'horizon 2050 et 3,7 – 4,8 °C à l'horizon 2100. Ces scénarios du Giec comportent toutefois de fortes incertitudes. Cette incertitude ne modifie pas les résultats présentés dans le graphique 2 mais modifie l'horizon temporel auquel les différents niveaux de réchauffement pourraient intervenir. Il est important de mentionner à cet égard que les premiers résultats des simulations qui serviront au prochain rapport d'évaluation du Giec⁶⁸ tendent à montrer que l'élévation des températures à niveau de politique inchangé sera plus importante que ne le prévoyaient les précédentes évaluations, de l'ordre de 1°C supplémentaire. Ces nouveaux résultats devraient donc, à horizon donné, accentuer les dommages mentionnés précédemment.

De nombreux travaux suggèrent par ailleurs une forte non-linéarité et l'existence d'effets de seuil dans les dynamiques en jeu⁶⁹. En effet, concernant la dynamique du système climatique, les scientifiques ont identifié des « points de basculement » qui peuvent survenir au cours du réchauffement climatique et qui ont un potentiel de déstabilisation systémique (Lenton, 2011). Parmi ces points de basculement, on peut citer la fonte des glaces du Groenland, de l'Arctique et l'Antarctique, la fonte du permafrost, l'arrêt de la circulation de certains courants marins dans l'Atlantique, le dépérissement des puits de carbone des forêts boréales canadiennes et de l'Amazonie, etc. Le franchissement des seuils qui activeraient ces phénomènes pourrait massivement accélérer et intensifier le réchauffement climatique. Dans la mesure où les points de basculement ont une probabilité d'occurrence qui augmente avec le niveau de réchauffement et qu'ils rétroagissent en partie les uns sur les autres, plusieurs études estiment que des scénarios de réactions en chaîne sont possibles. Selon plusieurs études récentes, ce type de scénario, qui entrainerait le système climatique sur une trajectoire possiblement incontrôlable et qui aurait de graves conséquences sur la stabilité économique et sociale à l'échelle mondiale, est possible à partir d'un réchauffement de 2°C (Steffen, *et al.*, 2018), voire de 1°C (Lenton, *et al.*, 2019)⁷⁰.

1.3.2 L'incertitude liée à la dynamique des impacts économiques

Une forte incertitude existe sur le niveau des dommages à de forts niveaux de réchauffement. Comme le montre bien le graphique 2, le niveau d'incertitude des estimations de dommage augmente avec le niveau du réchauffement associé. Ce niveau d'incertitude devient structurellement très élevé à partir d'une hausse de 3°C faute de repères empiriques suffisants⁷¹. Par exemple, pour un même niveau de réchauffement (6 C), Nordhaus (2014) estime les dommages à 10 % du PIB alors qu'Howard et Sterner (2017) les évaluent à 35 %. Ces incertitudes sont liées, entre autre, à la difficulté de quantifier les coûts des événements extrêmes dont l'ampleur dépasse le champ des connaissances⁷². Comme expliqué *supra*, dans certains modèles, la fonction de dommage est calibrée à de forts niveaux de températures en extrapolant les résultats d'impacts pour 1 à 3°C de réchauffement⁷³, ce qui limite la fiabilité des estimateurs au-dessus de 3 C. Les nouvelles approches économétriques utilisant des données de panel estiment des résultats autour de 4 à 5 C de réchauffement⁷⁴ et identifient des dommages beaucoup plus élevés que les précédentes approches.

À l'opposé du spectre, l'approche énumérative est la seule à estimer des effets bénéfiques significatifs à de faibles niveaux de réchauffement⁷⁵. Cela s'explique par le fait que le secteur agricole, particulièrement étudié dans cette approche (Fankhauser, 1995), pourrait bénéficier d'un réchauffement dans certaines régions du monde froides et tempérées. En outre, il existe une forte incertitude sur le seuil exact du niveau de

⁶⁸ Rapport qui sera publié en 2021 dans le cadre du sixième cycle d'évaluation (AR6), (Belcher, *et al.*, 2019).

⁶⁹ Sinon une simple extrapolation linéaire suffirait.

⁷⁰ Sur la base des derniers résultats du Giec - IPCC (2018) et IPCC (2019).

⁷¹ Cf. Howard et Sterner (2017), *Ibid*, par exemple.

⁷² Et donc pour lequel nous n'avons aucune donnée d'impact disponible.

⁷³ Diaz et Moore (2017), *Ibid*.

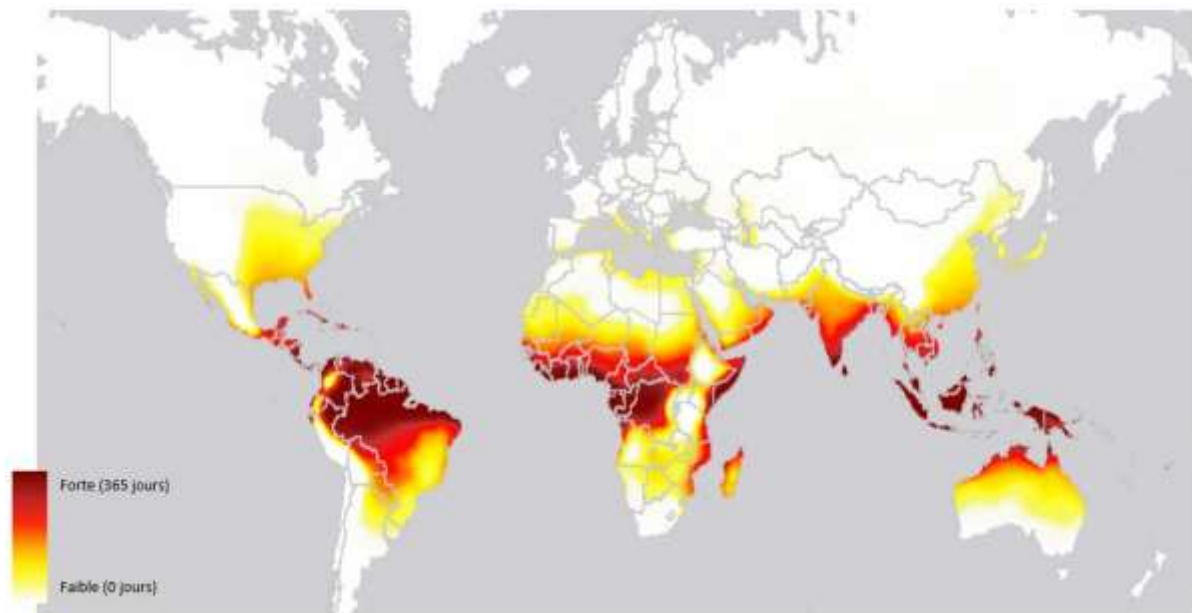
⁷⁴ Dell *et al.* (2012), *Ibid*, Burke *et al.* (2018), *Ibid*, par exemple.

⁷⁵ Exception faite de la méta-analyse qui peut en trouver certains comme chez Tol (2018), « The Economic Impacts of Climate Change », *Review of Environmental Economics and Policy*. Néanmoins, ce résultat est lié à la prise en compte d'analyses énumératives qui obtiennent des bénéfices à de faibles niveaux de réchauffement.

réchauffement à partir duquel l'effet devient négatif. Selon le Giec⁷⁶, l'impact économique au niveau mondial devient négatif à partir d'une augmentation des températures comprise entre 1 et 2°C. À l'inverse, les méthodologies en données de panel, à l'instar de Burke *et al.* (2018), concluent à des dommages importants (jusqu'à 10 %) dès un réchauffement global de 1 C. Il convient enfin de rappeler que le réchauffement de la fin des années 2010 aurait atteint de l'ordre de 1°C par rapport à l'ère préindustrielle (IPCC, 2018).

Au-delà de la non-linéarité de la dynamique climatique (*cf. supra* 1.3.1), des effets de seuil pourraient apparaître également dans la dynamique des dommages économiques. En effet les variables structurelles telles que la productivité du travail, le rendement des cultures, ou les services écosystémiques rendus par l'environnement (par exemple les ressources en eau douce), pourraient buter petit à petit sur des contraintes physiques et biologiques au fur et à mesure du réchauffement, impliquant des décrochages rapides dans leurs dynamiques. Si ces seuils étaient franchis, les capacités d'adaptation des sociétés seraient significativement réduites, ce qui pourrait accélérer la croissance des conflits, des flux migratoires, des inégalités, etc. À titre d'illustration de seuil physique aux fortes implications économiques et sociales, en 2100 75 % de la population mondiale serait exposé plus de 20 jours par an à des conditions climatiques dites « potentiellement mortelles »⁷⁷ dans un scénario sans politiques de réduction d'émission supplémentaires (*cf.* graphique 4)⁷⁸.

Graphique 4 : Nombre de jours par an lors desquelles les conditions climatiques (chaleur et humidité excessives) augmentent significativement le taux de mortalité – projections en 2100 dans le cadre d'un scénario « business as usual » (scénario RCP 8.5 du Giec)



Source : Mora *et al.*, (2017). "Global risk of deadly heat". *Nature Climate Change*.

Par ailleurs, la vitesse de réchauffement n'est pas prise en compte dans les modèles d'estimation des dommages alors que c'est un paramètre déterminant du niveau de dommages. En effet, un changement climatique beaucoup plus soudain que prévu limiterait de manière importante les possibilités d'adaptation individuelles et participerait à augmenter sensiblement les dommages.

1.3.3 L'incertitude liée aux instruments de mesure économique

Au-delà des impacts sur les biens et services dits marchands⁷⁹ qui représentent l'essentiel des effets analysés jusqu'ici, le changement climatique aurait également des impacts sur les secteurs non marchands

⁷⁶ Giec (2018), *Ibid.* Les études recensées par le Giec permettant de tirer cette conclusion reposent sur des estimations économétriques ou de modèles d'évaluation intégrée.

⁷⁷ Ces conditions ayant empiriquement entraîné des hausses significatives de la mortalité.

⁷⁸ Mora *et al.* (2017), *Ibid.*

⁷⁹ Possédant une valeur monétaire et étant comptabilisée dans le PIB.

(santé, éducation) dont il est très difficile d'anticiper toutes les implications économiques, et ce quelle que soit la méthodologie retenue. En outre, l'impact indirect des dommages sociaux⁸⁰ (augmentation des inégalités, augmentation des conflits) ou environnementaux (pertes de biodiversité) associés aux changements climatiques sur l'activité pourrait être mal pris en compte dans les modèles évoqués. Dans certaines évaluations, les dommages sont ajustés artificiellement à la hausse⁸¹ pour incorporer ces dommages non marchands.

En outre, il est important de rappeler que l'impact sur l'activité économique n'est pas le même que celui sur le bien-être. Le changement climatique aurait des conséquences sur le bien-être dont le PIB n'est qu'une mesure partielle (Stiglitz, *et al.*, 2009). Certaines approches tentent ainsi d'élaborer des indicateurs alternatifs⁸². Le rapport Stern⁸³ recourt par exemple à la notion d'équivalent de croissance équilibrée⁸⁴ pour ramener les pertes de PIB étalées dans le futur à une valeur présente en termes de bien-être social⁸⁵ (le rapport Stern est l'une des rares études à aborder les impacts sur le bien être de manière détaillée, mais son analyse reste partielle⁸⁶). Ainsi, l'augmentation de la consommation en énergie ou de dépenses liées au changement climatique (l'achat de climatiseurs par exemple) sont considérés comme des coûts d'opportunités dans la mesure où ces dépenses contraintes réduisent les possibilités d'autres investissements destinés à augmenter le bien-être. Cette approche tente donc d'approximer un coût du changement climatique sur la consommation « utile », c'est-à-dire sur la consommation qui modifie le bien-être.

La difficulté à quantifier les impacts des catastrophes naturelles (inondations, sécheresses, tempêtes, incendies géants, etc.) dues au réchauffement climatique est également une limite importante commune à l'ensemble des méthodologies d'estimation des dommages. En effet, le changement climatique entraînerait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes⁸⁷. Outre les incertitudes élevées liées à l'ensemble de ces évolutions, l'estimation des dommages des catastrophes naturelles dépend directement du stock de biens touchés, et est donc particulièrement sensible aux dynamiques de développement économique et d'aménagement du territoire, elles-mêmes comportant de fortes incertitudes plus l'horizon s'éloigne. À l'instar des impacts non marchands, certaines analyses des dommages du changement climatique utilisent des méthodes frustes pour prendre en compte l'impact des catastrophes naturelles sans que cela n'apparaisse véritablement satisfaisant⁸⁸.

Ainsi, les travaux tentant de compléter les estimations de l'impact direct sur l'activité par les impacts indirects restent limités en nombre et ne permettent pas de donner une estimation quantitative fiable de ces impacts sur le PIB. Toutefois ils constituent un enrichissement précieux aux travaux quantitatifs, dont les limites ont été exposées en 1.3.2 et 1.3.3. Surtout ils confirment que les risques associés aux estimations quantitatives présentées en 1.2. sont bien davantage à la hausse qu'à la baisse, et sont potentiellement massifs – il n'est notamment pas exclu que les effets indirects dépassent largement les effets directs.

1.3.4 Enjeu des scénarios « extrêmes »

La prise en compte par les modèles climatiques et économiques des points de basculement évoqués dans les parties 1.3.1 et 1.3.2 est considérée comme très insatisfaisante par de nombreux chercheurs (par exemple Stoerk, *et al.* (2018) ou Kopp, *et al.* (2016)). Ils appellent notamment le Giec à mieux intégrer dans

⁸⁰ Cette catégorie d'impact est la plus compliquée à quantifier et à intégrer dans les estimations des dommages économiques du changement climatique. Si des études se multiplient pour chercher un lien entre ces phénomènes (*cf.* partie 2) aucune ne permet d'en déduire directement des impacts économiques.

⁸¹ Augmentation de 25% dans l'approche de Nordhaus (2013) ou dans Howard et Sterner (2017), *Ibid*, qui se réfèrent à Nordhaus, sans que cette valeur soit justifiée par ailleurs.

⁸² Par exemple, Costanza *et al.* (2009). Voir OCDE (2016), *Ibid*, pour une recension de ces différentes tentatives.

⁸³ Stern, (2007).

⁸⁴ *Balanced Growth Equivalent* en anglais.

⁸⁵ Ici, la question du choix du taux d'actualisation est centrale. La valeur retenue par Stern dans son rapport a été contestée par de nombreux auteurs (*cf.* Nordhaus (2007)).

⁸⁶ *Cf.* J. Célestin-Urbain (2008), *Trésor-Éco* n° 30, *op. cit.*

⁸⁷ Et peut-être également une augmentation de leur durée ou une extension spatiale. *Cf.* Batten (2018), *Ibid*.

⁸⁸ Voir Batten (2018), *Ibid* pour une revue de littérature plus détaillée. Voir les résultats par exemple des études suivantes sur les impacts des catastrophes naturelles : Hsiang et Jina (2014), Von Peter *et al.* (2012), Noy (2009), Raddatz (2007), Leiter *et al.* (2009), Martin *et al.* (2011), Cavallo *et al.* (2010).

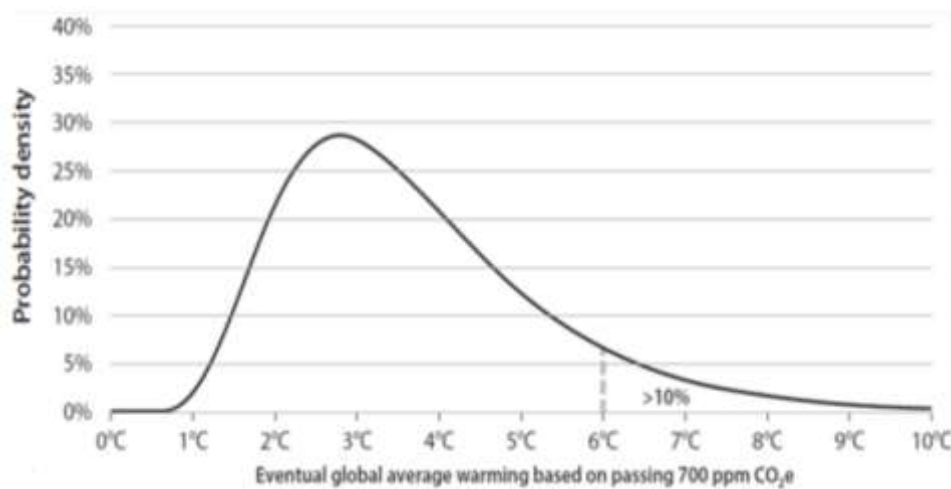
ses rapports d'évaluation cette problématique ainsi que l'enjeu plus général associé aux incertitudes. En effet le Giec, ainsi que la plupart des modèles d'évaluation intégrée évoqués en partie 1.1.1, concentrent leurs efforts d'analyse sur les scénarios les plus probables.

Cette approche conservatrice est contestée notamment par Weitzman⁸⁹ qui considère que les scénarios extrêmes ne peuvent être ignorés dans la mesure où ceux-ci pourraient apparaître avec une probabilité non négligeable. Il évalue que la distribution des états futurs du climat ne suit pas une loi de Gauss (ce qui justifierait de ne pas tenir compte des scénarios extrêmes puisque la probabilité des différents états en queue de distribution de Gauss diminue exponentiellement). Selon les analyses de Weitzman, cette distribution suit au contraire une loi de probabilité à queue lourde (en anglais « fat-tailed distribution », dont les événements extrêmes n'ont pas une probabilité négligeable). Ses calibrations correspondent en particulier à une distribution de Pareto. Il évalue ainsi que la probabilité d'un réchauffement dépassant 6°C dans un scénario à politiques inchangées est de 6 % (Weitzman, 2011) voire de 10 % (cf. Weitzman & Wagner (2015) et l'illustration du graphique 5). Weitzman considère que ces résultats invalident l'approche « coût-bénéfice » reposant sur des scénarios médians de dommage, approche retenue en particulier par les modèles d'évaluation intégrée pour évaluer la pertinence des politiques de réduction d'émissions. En effet, au-delà des fortes incertitudes déjà évoquées minorant très probablement l'évaluation des dommages médians, la probabilité significative de voir apparaître des scénarios remettant en cause fondamentalement les capacités des sociétés humaines à s'adapter au changement climatique devrait justifier en soi une action radicale contre les émissions de gaz à effet de serre. Ces politiques pourraient ainsi être considérées selon lui comme des primes d'assurance contre les scénarios extrêmes (à l'instar des primes d'assurance individuelles contre les risques d'incendie, d'inondation, etc.).

Ces travaux de Weitzman ont suscité un débat important parmi les économistes du climat (voir en particulier Pindyck (2010) et Nordhaus (2012)). Outre les aspects méthodologiques des discussions, Nordhaus estime notamment que les scénarios extrêmes constituent un réel enjeu pour l'évaluation des dommages du changement climatique, mais que l'évolution actuelle du système climatique ne semble pas correspondre aux trajectoires prévues par les scénarios extrêmes. Il lui semble donc injustifié à ce stade de prendre des mesures radicale contre les émissions. Il reconnaît néanmoins que ce constat mérite d'être réévalué périodiquement (Nordhaus, 2011). À cet égard, les résultats récents des sciences climatiques semblent justifier d'étudier attentivement cette question à nouveau. Tant du fait de l'amélioration des outils d'évaluation, que de l'exploitation des derniers relevés de données, ces résultats semblent en effet indiquer que le réchauffement climatique s'accélère plus vite qu'anticipé, et que les points de basculement pourraient être atteints à des réchauffements plus faibles que prévus (cf. IPCC (2018), IPCC (2019), Belcher *et al.* (2019), Lenton *et al.* (2019) ou Steffen *et al.* (2018)).

⁸⁹ Voir (Weitzman, 2009), (Weitzman, 2011), (Weitzman, 2012) et (Weitzman & Wagner, 2015).

Graphique 5 : Courbe théorique illustrant ce que serait un possible biais en faveur des réchauffements extrêmes dans la distribution statistique des états futurs du climat (long-tailed)



Source : Weitzman & Wagner (2015).

2. Impacts sectoriels et socio-économiques du changement climatique

L'approche agrégée n'apporte qu'une image partielle des effets du changement climatique dans la mesure où ces effets seraient très hétérogènes en fonction des régions et des secteurs de production. Cette seconde partie a donc pour objectif principal d'identifier – principalement de manière qualitative – les impacts importants du changement climatique au niveau désagrégé. Les approches sectorielles et socio-économiques permettent ainsi d'avoir une analyse plus fine des différents canaux de transmission des impacts climatiques. Toutefois, cette analyse est moins quantitative et doit parfois se limiter à illustrer certains canaux de transmission. Ainsi cette seconde partie s'appuie moins sur des résultats empiriques que la partie précédente. En effet, si certains impacts chiffrés sont présentés au cours de l'analyse, le niveau de ces impacts doit être appréhendé uniquement comme un ordre de grandeur illustrant l'importance de l'effet et son canal de transmission. Compte tenu de la diversité considérable d'outils d'évaluation et d'hypothèses de calcul qui ont servi à produire ces chiffres, ils ne peuvent en aucun cas être comparés ou agrégés. Il peut arriver par exemple que les scénarios de réchauffement sous-jacents aux estimations ne soient pas les mêmes et que certains supposent des politiques de réduction d'émissions dont il faudrait théoriquement évaluer les effets pour avoir l'impact économique consolidé. À cet égard on peut noter que certaines politiques de réduction d'émission pourraient permettre d'atténuer les impacts du changement climatique sur certains secteurs comme la rénovation thermique des bâtiments qui permettrait de moins recourir aux climatiseurs pendant les périodes de forte chaleur. Ou à l'inverse le développement de centrales nucléaires qui participeraient à la décarbonation du mix électrique mais qui sont particulièrement vulnérables au changement climatique à cause du réchauffement de l'eau des rivières utilisées pour refroidir les réacteurs (cf. partie 2.1.2).

Dans cette deuxième partie, les résultats présentés résultent ainsi d'effets directs et isolés du changement climatique alors que l'on a vu en première partie que les effets indirects pouvaient se révéler être d'un niveau très significatif. Il faut donc encore une fois interpréter les chiffres avec prudence.

Si l'ensemble des secteurs de l'économie devraient être touchés, possiblement massivement, par les changements climatiques, il est intéressant de mettre en évidence les canaux de transmission pour cinq secteurs particuliers (cf. 2.1) : le secteur agricole, le secteur de l'énergie, le secteur des infrastructures, le secteur financier et le secteur du tourisme. Il semble également crucial de mettre en avant les travaux existants sur quatre aspects des impacts des changements climatiques sur l'activité (cf. 2.2) : la productivité, la santé, le commerce et les enjeux d'instabilité politique.

2.1 Impacts sectoriels

2.1.1 Secteur agricole

Compte tenu de sa dépendance structurelle aux conditions météorologiques, l'agriculture serait le secteur le plus directement vulnérable au changement climatique (European Environment Agency, 2019). Le secteur devrait connaître de forte variation du volume et de la qualité de sa production, y compris les activités de pêche et d'élevage. La quantification des impacts est néanmoins particulièrement incertaine du fait de l'hétérogénéité des effets selon les différentes activités agricoles, et des nombreux effets de seuils existant sur les rendements.

Les changements climatiques (augmentation des températures, modification des précipitations, etc.) diminueraient les rendements agricoles dans la plupart des régions. Les pertes lors des jours les plus chauds expliqueraient la majorité de cette diminution (Carleton & Hsiang, 2016). Cet effet serait exacerbé par la prolifération nouvelle d'insectes ou de bactéries s'attaquant aux cultures (Deutsch, *et al.*, 2018). La diminution des rendements serait compensée, en partie seulement, par l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'atmosphère qui aurait un impact fertilisant sous certaines conditions (Drake, *et al.*, 1997). Ainsi, dans le cadre d'un scénario *business as usual*, environ 90 % de la population serait exposée à des pertes simultanées de production dans l'agriculture et la pêche à horizon 2100 selon une étude récente (Lauric, *et al.*, 2019). Le secteur devrait connaître une grande diversité dans les évolutions des rendements. Si les économies peuvent s'adapter à moyen-long terme en modifiant les types de cultures, cette évolution prend du temps et, à court terme, les pertes moyennes de rendements peuvent être massives. Le coût du changement climatique sur le secteur agricole est donc pour une part importante lié aux coûts liés à l'adaptation progressive du secteur (*via* la nécessité d'effectuer des substitutions entre cultures notamment).

En outre, le changement climatique aurait tendance à accroître la variabilité des rendements agricoles dans le temps (IPCC, 2014), à cause de l'augmentation de la variabilité des températures et des précipitations (Kukul & Irmak, 2018). Un réchauffement de 4 °C augmenterait de plus de 5 % le coefficient de variation interannuelle⁹⁰ dans 64 % des cultures étudiées dans les travaux recensés par le Giec, et une diminution de plus de 5 % pour 29 % des cas (Müller & Robertson, 2014). Les études montrent également la variété des impacts en fonction des types d'activités agricoles. En effet, les différentes cultures ont des niveaux optimaux de températures spécifiques et des sensibilités aux concentrations de CO₂ variées (Lobell & Gourdji, 2012), rendant le calcul des impacts au niveau mondial assez incertain⁹¹.

Le changement climatique n'aurait pas simplement un impact sur la quantité produite mais modifierait également la qualité des produits. Pour un réchauffement de 2,5 °C à horizon 2050, les contenus en zinc, en fer et en protéines de nombreuses cultures alimentaires devraient connaître une diminution comprise entre 3 et 17 % (Smith & Myers, 2018). De plus, le changement climatique devrait diminuer la qualité des produits issus de l'élevage du fait de la prolifération des maladies et de la hausse du stress thermique auquel seraient soumis les animaux. Cela se caractériserait par une diminution du contenu en protéine et une hausse de la teneur en gras (Gregory, 2010).

Les effets sur la production agricole seraient répartis de manière hétérogène à la surface du globe. Le secteur agricole dans les pays proches de l'équateur serait plus fortement touché que dans les pays situés dans les hautes latitudes, en particulier Russie, pays scandinaves, Canada et Amérique du Sud. L'agriculture dans ces dernières régions, qui représente aujourd'hui moins de 7 % de la valeur de la production agricole au niveau mondial⁹², est même susceptible de bénéficier du réchauffement grâce à un prolongement de la saison de croissance et à l'agrandissement de la superficie cultivable⁹³. À l'inverse, les pertes agricoles seraient beaucoup plus importantes dans les régions plus chaudes comme en Afrique, en Amérique Centrale et en

⁹⁰ Le coefficient de variation est le rapport de l'écart-type à la moyenne. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande.

⁹¹ Voir les désaccords sur les pertes de rendement en fonctions des types de cultures en comparant les résultats de Knox *et al.* (2012), et Wiebe *et al.* (2015).

⁹² Données de la Banque Mondiale, (<https://data.worldbank.org/topic/agriculture-and-rural-development>).

⁹³ IPCC (2014), *Ibid.*

Asie du Sud et du Sud-Est⁹⁴ représentant aujourd’hui près de 53 % de la production agricole mondiale⁹⁵. Il s’agit de régions où se concentrent des économies beaucoup plus dépendantes des activités agricoles⁹⁶ (à titre d’illustration, le secteur agricole représente 22 % du PIB et 60 % des revenus d’exportations en Côte d’Ivoire en 2017⁹⁷) et plus sensibles à la hausse des températures (cf. encadré 2 et FMI (2017)).

Le cas de la France est assez singulier puisque le changement climatique pourrait faire apparaître des effets légèrement positifs au Nord et au Nord-Est, alors que des chutes de rendements apparaîtraient dans le Sud et le Sud-Ouest induites par la combinaison des températures excessives et des sécheresses⁹⁸. Par exemple, le secteur viticole connaîtrait des variations de rendement considérables, avec des hausses de plus de 35 % en Bourgogne et des pertes allant jusqu’à 25 % dans le Languedoc-Roussillon⁹⁹.

2.1.2 Secteur énergétique

L’élévation de la température moyenne, le changement des saisonnalités ou l’augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes modifieraient non seulement la demande énergétique mais aussi sa production et sa distribution. Les systèmes énergétiques seraient donc directement touchés alors même qu’ils jouent un rôle critique dans les stratégies d’adaptation individuelles des acteurs économiques face au changement climatique (chauffage et climatisation notamment)¹⁰⁰ et dans les actions d’atténuation (réduction de l’utilisation des énergies fossiles, déploiement des énergies renouvelables). La quantification des impacts sur ce secteur est assez incertaine à cause des nombreux effets à prendre en compte et des différentes possibilités d’adaptation du secteur.

En général, l’effet de la température sur la demande énergétique est fortement non-linéaire aux températures extrêmes et suit une courbe en « U »¹⁰¹ : la demande d’énergie augmente lorsque les températures sont très faibles (demande de chauffage) et très fortes (demande de climatisation). La hausse des températures aurait donc deux effets opposés sur la consommation d’énergie : une baisse des besoins de chauffage dans les régions froides et tempérées et une augmentation des besoins liés à la climatisation notamment dans les régions chaudes du globe¹⁰². Le contraste en fonction des régions est ainsi important : la Russie connaîtrait une baisse de sa demande en électricité de plus de 5 % d’ici 2050 alors que l’Inde la verrait progresser de près de 8 % sur la même période¹⁰³.

Dans le cas de la France, l’Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (Onerc) prévoit une baisse de la consommation énergétique nationale de plus de 3 % à l’horizon 2100 par rapport à la situation actuelle¹⁰⁴. En outre, la demande pour les différents vecteurs énergétiques est susceptible d’évoluer de manière différenciée : ainsi, la baisse de la demande de chauffage pourrait à la fois conduire à une baisse de la demande de gaz et d’électricité, alors que la hausse des besoins de climatisation se traduirait par une hausse de la consommation électrique. Au-delà de ces considérations, les impacts du changement climatique sur la demande d’énergie dépendent des efforts d’efficacité énergétique qui seront déployés en parallèle de la hausse des températures, ainsi que des évolutions dans l’aménagement urbain.

Côté offre, le changement climatique toucherait surtout la production d’énergie électrique. L’exploitation des centrales hydrauliques mais aussi des centrales thermiques et nucléaires serait fortement pénalisée par l’abaissement du niveau et l’augmentation de la température des cours d’eau, ce qui pourrait limiter les capacités de production instantanées mais également la capacité de stockage permise par les barrages. Cet effet est déjà visible dans la gestion des centrales nucléaires qui ont un besoin d’eau important pour refroidir leurs réacteurs¹⁰⁵, mais qui sont obligés d’interrompre leur prélèvement sur les cours d’eau en cas de trop

⁹⁴ OCDE (2016), *Ibid.*

⁹⁵ Données de la Banque Mondiale, (<https://data.worldbank.org/topic/agriculture-and-rural-development>).

⁹⁶ Hallegatte, *et al.*, (2016).

⁹⁷ En valeur en 2017. Données de la Banque Mondiale, (<https://data.worldbank.org/country/cote-divoire>).

⁹⁸ <https://agriculture.gouv.fr/debat-regards-croises-sur-lagriculture-et-le-changement-climatique>.

⁹⁹ ONERC (2009), *Ibid.*

¹⁰⁰ Auffhammer (2018).

¹⁰¹ Carleton et Hsiang (2016).

¹⁰² ONERC (2009), *Ibid.*

¹⁰³ Bosello et Parrado (2014), Ces résultats sont calculés dans le cadre du RCP 8.5.

¹⁰⁴ Dans le cadre d’un scénario A2 soit un niveau de réchauffement compris entre 2 et 5,4 °C.

¹⁰⁵ Chaque degré de réchauffement pourrait conduire à réduire la production des centrales nucléaires de 2% (cf. Linneru *et al.* (2011)).

forte température de ceux-ci. Cet effet serait exacerbé par la multiplication des conflits d'usage entre les différentes activités (industrielles, agricoles, urbaines etc.) qui dépendent de cette ressource. En outre, l'augmentation des températures diminuerait l'efficacité de la conversion thermique des technologies fossiles, nucléaires ou photovoltaïques (Mideksa & Kallbekken, 2010)¹⁰⁶. À l'inverse, le réchauffement permettrait de nouvelles possibilités d'extractions dans les régions polaires pour les activités pétrolières et gazières – l'exploitation de tels gisements posant toutefois des difficultés concernant l'atténuation du changement climatique. Enfin, l'estimation de l'impact sur la production des énergies éoliennes ou marémotrices est difficile, les prévisions d'évolution des régimes de vents du fait du changement climatique étant par exemple très incertaines.

En outre, le réseau de distribution de l'énergie subirait également des dommages. D'abord, les fortes températures devraient endommager et réduire la conductivité des câbles électriques actuels¹⁰⁷. Ensuite la multiplication des catastrophes naturelles augmenterait le risque d'endommagement des réseaux électriques et de pipelines.

Enfin, le réchauffement induirait des problèmes accrus d'ajustement de l'offre et de la demande d'énergie. En effet, les épisodes de forte chaleur provoqueraient une augmentation de la demande tout en restreignant la production et le transport d'électricité. Par exemple, la multiplication des dispositifs de climatisation¹⁰⁸ entraînerait une hausse des pics de demande en période estivale, compliquant la gestion du réseau électrique puisque les centrales thermiques (nucléaire inclus) subissent une baisse de leur rendement thermodynamique si la température extérieure augmente¹⁰⁹. Ces mêmes centrales, qui représentent près de 75 % du mix électrique au niveau mondial¹¹⁰, auraient en parallèle de plus en plus de mal à fonctionner, alors même que le potentiel hydroélectrique pourrait être réduit. Toutefois il convient de prendre en compte les évolutions de l'offre d'électricité dans l'analyse de l'évolution de l'ajustement de l'offre et de la demande : en particulier, cet ajustement pourrait être amélioré par une meilleure corrélation de la demande avec les heures de production d'électricité photovoltaïque.

2.1.3 Secteur des infrastructures

Les secteurs de la construction, du bâtiment et du logement ainsi que les secteurs du transport risquent de subir de nombreux dommages ou destructions ainsi qu'une augmentation des coûts d'entretien à causes des différents impacts physiques du changement climatique. En outre, les possibilités de circulation, notamment maritimes, pourraient être modifiées. Néanmoins, ce secteur manque particulièrement d'études d'impacts.

En plus du stress thermique, l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes augmenterait les coûts de construction¹¹¹ et d'entretien des bâtiments. L'endommagement des bâtiments et des infrastructures devrait en effet augmenter fortement avec les changements climatiques. Ces dommages seraient majoritairement causés par l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, et notamment de celles des tempêtes et inondations qui seront les catastrophes les plus coûteuses au niveau mondial¹¹². Les grandes agglomérations seraient particulièrement vulnérables du fait de leur forte concentration en capital¹¹³. Dans le cas français ces dommages seraient essentiellement causés par les

¹⁰⁶ Les centrales thermiques sont plus efficaces quand l'écart de température entre la centrale et l'air extérieur est important. Les centrales nucléaires seront surtout pénalisées par le besoin en eau (bien que l'effet précédent s'applique aussi). Les technologies photovoltaïques ont aussi une moindre efficacité de conversion thermique à cause de ses composants (*cf.* travaux du Giec).

¹⁰⁷ Voir (DOE, 2013).

¹⁰⁸ L'usage des climatiseurs représente aujourd'hui près de 20 % de la consommation d'électricité des bâtiments dans le monde, et l'AIE prévoit qu'en 2050 les besoins énergétiques pour la climatisation feront plus que tripler, devenant ainsi la deuxième source de croissance de la demande d'électricité (IEA, 2018).

¹⁰⁹ Le rendement dépend de la différence entre les températures des sources chaudes (combustion ou réaction) et froides (extérieur) du cycle thermodynamique.

¹¹⁰ (IEA, 2019).

¹¹¹ À cause de la construction de bâtiments plus résilients aux impacts du changement climatique (normes anti-inondations etc.).

¹¹² Munich Re (2005).

¹¹³ IPCC (2014), *Ibid.*

inondations et les épisodes de sécheresse¹¹⁴, qui représentent à eux seuls 91 % de la sinistralité française¹¹⁵ et dont la fréquence augmenterait fortement avec les changements climatiques.

Les coûts de construction et d'entretien augmenteraient également pour les infrastructures de transports. Le stress thermique concernerait les infrastructures de transports qu'elles soient routières (détérioration des routes asphaltées), ferroviaires (dégradation des caténaires) ou aériennes (pistes de décollage et d'atterrissage notamment). En outre, les ports seraient particulièrement touchés à cause de températures plus élevées, de la hausse du niveau de la mer, de tempêtes de plus en plus sévères et de précipitations accrues¹¹⁶. À l'inverse, des conditions hivernales plus clémentes réduiraient les coûts d'entretiens des routes à cause d'épisode de froids moins fréquents et moins intenses.

Le dérèglement climatique impliquera probablement une modification profonde des réseaux de transport notamment maritimes et fluviaux. En effet, le réchauffement et la fonte des glaces permettrait la navigation dans l'Océan Arctique et l'exploitation économique des passages du Nord-Est et du Nord-Ouest. À l'inverse, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes entraînerait des coûts de transport et de maintenance plus élevés ainsi que des retards plus fréquents liés aux conditions climatiques¹¹⁷. La navigation fluviale et lacustre devrait aussi être touchée en raison de la baisse des niveaux d'eau (Lemmen & Warren, 2004). Cela pourrait par exemple augmenter les coûts de transport annuels de 29 % en 2050 dans la région des Grands Lacs d'Amérique du Nord (Millerd, 2011).

2.1.4 Secteur financier

Le changement climatique devrait peser sur la stabilité financière (Banque de France, 2019). Outre les risques opérationnels plutôt faibles dans le secteur bancaire ou assurantiel, le dérèglement climatique ferait principalement peser¹¹⁸ des risques physiques et un risque de transition¹¹⁹ (ce dernier risque ne rentre pas dans le périmètre de cette étude).

Les risques physiques correspondent aux pertes financières directes causées par les risques chroniques (montée des océans, réchauffement etc.) ou par le risque d'occurrence d'événements météorologiques extrêmes (Aubert, *et al.*, 2019). Ces risques physiques se transmettraient à l'ensemble du secteur financier par la dépréciation de la valeur des placements financiers touchés. Les risques physiques pourraient déstabiliser le secteur bancaire *via* trois canaux :

- Perturbation dans les systèmes de paiements qui mettrait en difficulté des entreprises souffrant de problèmes liquidités tout en étant solvables
- Ralentissement des flux de crédits
- La dépréciation de la valeur de certains actifs (défaillances de certaines entreprises avec des effets directs sur l'activité économiques).

Les effets du changement climatique se transmettraient également au secteur assurantiel (*cf.* graphique 6). Si les pertes couvertes sont larges et concentrées, elles peuvent entraîner les défaillances de certaines compagnies d'assurance. Par exemple, l'augmentation de la fréquence et du coût des événements extrêmes augmenterait la sinistralité¹²⁰ des biens assurés de 50 % en France métropolitaine d'ici à 2050¹²¹. Cette augmentation de la sinistralité aurait alors pour conséquence une augmentation des cotisations d'assurance et aboutirait à la non-assurabilité de certains risques.

¹¹⁴ Les épisodes de sécheresses causent des dommages sur les bâtiments et les infrastructures de nombreuses manières : fissures sur les murs, affaissement de dallage, ruptures de canalisations etc.

¹¹⁵ CCR (2018). *Ibid.*

¹¹⁶ IPCC (2014), *Ibid.*

¹¹⁷ IPCC (2014), *Ibid.*

¹¹⁸ Document de consultation publié en 2015 par la DG Trésor intitulé « L'évaluation des risques liés au changement climatique dans le secteur bancaire ». <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Ressources/File/433386>

¹¹⁹ Ce risque intègre les effets des politiques de réduction de gaz à effet de serre sur les acteurs économiques privés.

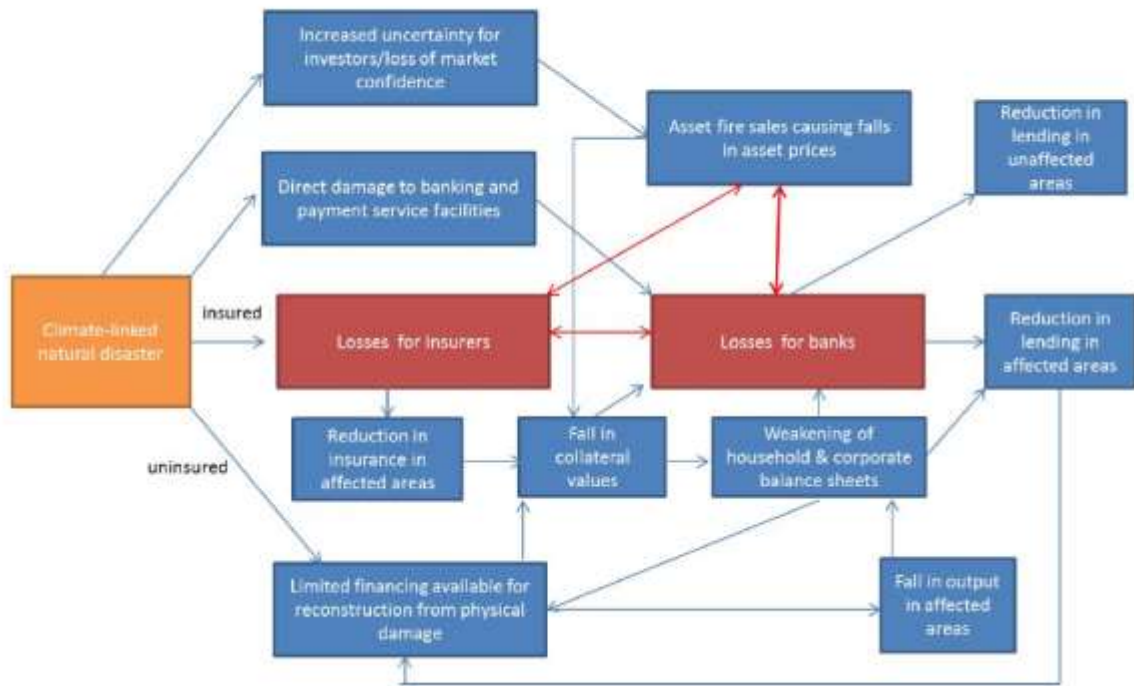
¹²⁰ Ratio entre le montant des sinistres à dédommager et celui des primes encaissées.

¹²¹ Rapport publié par la CCR en Septembre 2018 et intitulé : « Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 ».

La sous-assurance ou la non assurance de certains risques climatiques pourrait quant à elle amplifier les effets négatifs d'une catastrophe naturelle en limitant les activités de « reconstruction » (Batten, *et al.*, 2016)¹²². À titre illustratif, sur la période 2010-2018, seulement 35 % des pertes liées aux catastrophes naturelles étaient assurées.

Graphique 6 : Transmission d'un dommage climatique au secteur financier

Figure 2: A transmission map from a natural disaster to financial sector losses and the macroeconomy



Source : Batten *et al.* (2016).

2.1.5 Secteur du tourisme

Si le changement climatique ne réduirait pas nécessairement la demande touristique, il causerait en revanche une redistribution géographique et temporelle des flux touristiques ainsi qu'un ajustement de l'offre touristique, notamment dans les régions auparavant enneigées¹²³.

Ainsi, le changement climatique devrait induire une redistribution géographique des destinations en modifiant l'attractivité relative de certaines régions. Le changement climatique augmenterait l'attractivité des pays situés dans les hautes latitudes par rapport aux autres. L'OCDE¹²⁴ anticipe par exemple des augmentations substantielles de dépenses touristiques au Canada (+92 %), en Russie (+66 %) et aux États-Unis (+21 %) mais des impacts négatifs en Amérique Latine¹²⁵ (-27 %), en Afrique¹²⁶ (-20 %) ou en Asie (-20 %) à l'horizon 2060.

Le changement climatique pourrait conduire à une réorientation saisonnière des flux. Ainsi, l'été pourrait ne plus être la haute saison touristique dans le pourtour méditerranéen¹²⁷ (qui représente aujourd'hui 24 % des

¹²²Voir graphique 6.

¹²³ IPCC (2014), « Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ».

¹²⁴ OCDE (2016), *Ibid.* Ces chiffres expriment l'augmentation des dépenses touristiques en variation de pourcentage par rapport à un scénario sans changement climatique.

¹²⁵ Sauf au Chili et au Brésil.

¹²⁶ Les impacts négatifs en Afrique du Sud sont estimés à -14 %.

¹²⁷ Amengual *et al.* (2012).

flux mondiaux de touristes¹²⁸). De son côté, le tourisme urbain et culturel, notamment dans les pays développés, devrait être moins touché par ces modifications¹²⁹.

Le changement climatique pourrait en outre être à l'origine d'un ajustement de l'offre du tourisme montagnard (15,5 % du chiffre d'affaire touristique français¹³⁰). En France par exemple, un réchauffement de 4°C (et la diminution du niveau d'enneigement associé) ferait passer de 143 à 55 le nombre de domaines skiables bénéficiant d'un enneigement suffisant¹³¹. L'offre du tourisme hivernal s'adapterait donc en fonction du degré de vulnérabilité (nouvelles activités ne dépendant plus des ressources en neige par exemple, développement de l'attractivité estivale des régions montagnardes, etc.).

2.2 Impacts socio-économiques

2.2.1 Santé

Il existe trois voies principales par lesquelles le changement climatique influencerait l'état de santé des populations¹³² : les effets directs liés à l'occurrence des événements extrêmes et à l'augmentation des températures, les effets indirects liés à la dégradation des systèmes naturels (par exemple en favorisant le développement de certaines maladies) et les effets liés à des systèmes humains (par exemple en aggravant les conséquences des pics de pollution)¹³³.

Les différentes manifestations des changements climatiques (augmentation de la température moyenne, du niveau d'humidité etc.) entraîneraient une hausse des taux de morbidité¹³⁴ et de mortalité. En effet, on remarque une courbe en U de la mortalité en fonction de la température¹³⁵ : le taux de mortalité augmenterait fortement lorsque les températures sont très élevées ou très faibles. Par exemple, on estime que le taux de mortalité augmenterait de 2 % par degré au-dessus de 32,2 °C aux États-Unis (Deschênes & Moretti, 2009). Ainsi, l'augmentation moyenne des températures induirait une hausse de la morbidité et la mortalité liées aux fortes chaleurs et diminueraient celles causées par les faibles températures. Dans le cas de la France, un scénario de poursuite des émissions au rythme actuel¹³⁶ induirait une hausse du taux de décès imputable aux températures de 1 % en 2050, et de 4 % en 2100¹³⁷. D'autres changements climatiques comme l'augmentation des niveaux d'humidité ou de la fréquence des événements extrêmes (cyclones, inondations etc.)¹³⁸, combinés à la hausse des températures, auraient des conséquences sanitaires. Les populations vivant en Afrique et Asie du Sud seraient celles qui seront exposées aux manifestations les plus intenses des changements climatiques. Certes, ces régions étant déjà exposées à de fortes températures (Guo, *et al.*, 2014) et à des événements extrêmes plus fréquents (Hsiang & Narita, 2012), la hausse marginale de température devrait être similaire à celle des autres régions. Toutefois, les habitants de ces régions comptent parmi les populations avec les plus faibles ressources financières du monde, ce qui obère leur capacité à s'adapter à cette nouvelle situation, notamment vis-à-vis des enjeux de santé.

Le changement climatique aurait une influence sur l'état de santé des populations à travers ses effets indirects sur les milieux naturels. Par exemple, les changements climatiques favoriseraient la prolifération de certaines maladies transmises par des espèces animales comme les moustiques (malaria, dengue etc.) ou par l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminés (choléra et autres maladies diarrhéiques, etc.).

¹²⁸ World Bank data: <https://data.worldbank.org/indicator/ST.INT.ARVL>.

¹²⁹ IPCC (2014), *Ibid.*

¹³⁰ Atout France (2013).

¹³¹ ONERC (2009), *Ibid.*

¹³² IPCC (2014), *Ibid.*

¹³³ Il faudrait ajouter plus généralement l'ensemble des effets de la baisse de l'activité et de la richesse produite sur la santé (via la tension sur le financement du système de soin, l'investissement dans la recherche, etc.), sur lesquels cette partie ne reviendra pas.

¹³⁴ Pourcentage des populations malades dans une population. La morbidité définit plus généralement l'ensemble des causes ou des conditions pouvant exposer un individu à la maladie.

¹³⁵ Carleton et Hsiang (2016), *Ibid.* Voir Graphique 1.

¹³⁶ Scénario RCP 8.5.

¹³⁷ Document de travail du Sénat publié en 2019 et intitulé : « L'Adaptation de la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence Déclarée ».

¹³⁸ Carleton et Hsiang (2016), *Ibid.*

Le réchauffement climatique toucherait également les systèmes humains, induisant des conséquences pour l'état de santé des populations. Par exemple, il aggraverait notamment les conséquences sanitaires d'autres externalités plus localisées comme les pics de pollution de l'air dans les grandes métropoles¹³⁹ ou la prolifération des algues sur les zones côtières¹⁴⁰. En outre, selon le Giec¹⁴¹, le changement climatique menacerait les piliers de la sécurité alimentaire¹⁴² : la disponibilité (pertes de production), l'accès (hausse des prix des aliments), l'utilisation (baisse de la qualité nutritive) et la stabilité alimentaire (effets des événements extrêmes), créant de nouveaux enjeux de santé publique (The Global Food Security, 2015).

Selon l'OMS¹⁴³, le changement climatique pourrait causer entre 2030 et 2050 environ 250 000 décès supplémentaires par an au niveau mondial, dus à la malnutrition, au paludisme, aux maladies diarrhéiques et au stress thermique.

2.2.2 Productivité

Le réchauffement climatique aurait un impact sur la productivité du travail *via* ses effets sur la santé des travailleurs (à cause du stress thermique¹⁴⁴, des niveaux d'humidité etc.) et sur le marché du travail (destructions d'emploi et adaptations au niveau sectoriel).

La combinaison des changements climatiques, notamment l'augmentation des températures et des niveaux d'humidité, induirait des pertes de productivité du travail. Selon un rapport de l'Organisation Internationale du travail (OIT) de 2019, les températures élevées créent des risques pour la santé qui se traduiront en des pertes de productivité (ILO, 2019). La productivité du travail pourrait baisser jusqu'à 1,7 % pour chaque degré de réchauffement au-dessus de 15°C de température journalière moyenne (Deryugina & Hsiang, 2014) et une chute de la productivité des travailleurs de 50 % à partir de 33-34°C¹⁴⁵. Selon le Giec¹⁴⁶, à horizon 2100, les changements climatiques pourraient réduire la productivité du travail jusqu'à 60 % durant les mois les plus chauds par rapport au reste de l'année. Ces effets seraient potentiellement plus forts dans les secteurs exigeant des efforts physiques ou s'exerçant en extérieur. Ces emplois se trouvent généralement dans les secteurs agricoles, de la construction, des transports, du tourisme, des sports ou industriel¹⁴⁷.

Ces conséquences pourraient être particulièrement présentes dans les villes à cause de la multiplication des « îlots de chaleur urbains » – des zones où la chaleur se concentre en raison de la croissance démographique et de l'urbanisation – aggravant les risques auxquels sont exposés les travailleurs et augmentant les pertes de productivité. La combinaison du réchauffement avec d'autres changements climatiques comme la hausse de l'humidité ou d'autres externalités comme les pics de pollution de l'air, amplifieraient ces effets (Heal & Park, 2016).

La théorie économique suggère aussi que ces pertes induiraient des conséquences sur le marché du travail, comme la réduction des heures de travail. Cela s'expliquerait par le ralentissement de certaines chaînes de production (Wenz & Levermann, 2016) ou par l'accumulation de la fatigue liée aux fortes chaleurs réduisant la durée du travail en fin de journée¹⁴⁸. Les secteurs agricoles et de la construction, qui seraient particulièrement touchés, devraient représenter respectivement 60 % et 19 % des heures de travail perdues en 2030 au niveau mondial¹⁴⁹. En outre, le réchauffement déstabiliserait le marché du travail directement en menaçant certains types d'emplois (surtout agricoles et touristiques). À l'inverse, le changement climatique

¹³⁹ IPCC (2014), *Ibid.*

¹⁴⁰ Sénat (2019), *Ibid.*

¹⁴¹ IPCC (2019), "Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems".

¹⁴² IPCC (2019), *Ibid.*

¹⁴³ WHO (2014), "Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s", *World Health Organization*.

¹⁴⁴ On définit par stress thermique une chaleur excessive par rapport à celle que le corps peut tolérer sans souffrir d'altérations physiologique.

¹⁴⁵ Par rapport à une température moyenne journalière de 20 °C cf. ILO (2019), *Ibid.*

¹⁴⁶ IPCC (2014), *Ibid.*, selon le scénario RCP 8.5.

¹⁴⁷ Carleton et Hsiang (2014), *Ibid.*

¹⁴⁸ Le stress thermique lié au réchauffement devrait réduire le nombre total d'heures travaillées dans le monde de 2,2 % en 2030 par rapport à un scénario sans changement climatique (cf. ILO, 2019). C'est notamment le cas pour les secteurs primaires et secondaires qui seraient touchés par des réductions de près d'une heure de travail journalier à des températures supérieures à 30 °C - cf. Graff Zivin et Neidell (2014).

¹⁴⁹ ILO (2019), *Ibid.*

pourrait créer des opportunités d'emplois comme dans le secteur agricole de certaines régions à hautes latitudes (Russie ou Canada) ou dans les services (notamment santé, services à la personne etc.). Enfin, l'ensemble des transformations (pertes ou adaptations) liées aux changements climatiques dans l'économie devraient modifier la structure de la demande de travail à travers les rééquilibrages sectoriels. Cet impact sur l'emploi dépendra aussi de la capacité d'adaptation des compétences de la population active (via la formation et les possibilités de reconversions).

2.2.3 Commerce international

Le changement climatique aurait un impact sur le commerce international directement à travers les destructions d'infrastructures et l'augmentation des coûts de transports dues aux catastrophes naturelles et indirectement à travers la modification des avantages comparatifs et des effets difficilement quantifiables du changement climatique sur des phénomènes sociaux tels que les conflits et les migrations.

Les destructions d'infrastructures ainsi que l'augmentation des coûts de transports devraient pénaliser le commerce international. C'est notamment le cas pour les flux maritimes qui représentent plus de 70 % de la valeur des flux commerciaux mondiaux (Dellink, *et al.*, 2017). En effet, l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de fréquence des tempêtes augmenteraient les coûts de maintenance¹⁵⁰. Certains gains peuvent toutefois être attendus avec l'ouverture de nouvelles routes commerciales maritimes comme le passage du Nord-Est, auparavant impraticable une grande partie de l'année à cause des glaces, qui permettrait de relier l'Asie de l'Est à l'Europe en réduisant de manière significative les coûts et la durée du voyage.

En outre, l'impact climatique sur les productivités nationales entraînerait un ajustement des avantages comparatifs qui modifierait la répartition des flux commerciaux et constituerait une modalité d'adaptation à l'échelle mondiale¹⁵¹. Les économies les plus vulnérables au dérèglement climatique et les moins diversifiées verraient leurs coûts de production augmenter plus rapidement que leurs partenaires commerciaux, ce qui réduirait leur compétitivité relative. Ces pays verraient donc le solde de leur balance commerciale se détériorer à l'inverse des pays les moins touchés et les plus diversifiés¹⁵². En termes sectoriels, ce sont les échanges de biens agricoles qui seraient les plus touchés par ces changements¹⁵³. Les secteurs intensifs en facteur travail comme le textile ou les secteurs intensifs en énergie comme la métallurgie, seraient également particulièrement touchés (Dallmann, 2019). Cet ajustement de la production nationale et donc des flux commerciaux permettrait de diminuer les dommages économiques du changement climatique au niveau mondial¹⁵⁴. En effet, la hausse des coûts de production dans un pays serait compensée par une augmentation des importations permises par l'ajustement des flux commerciaux¹⁵⁵.

Les effets indirects du réchauffement climatique pourraient par ailleurs être beaucoup plus importants. En effet, le commerce international est intrinsèquement dépendant des équilibres géopolitiques dont les évolutions sont très incertaines. Par exemple, le changement climatique pourrait contribuer à l'éclosion de conflits, notamment ceux liés à l'accès aux ressources ou à de nouvelles migrations forcées (*cf. infra*). Ces tensions géopolitiques pourraient réduire fortement les flux commerciaux, rendant très incertaine la quantification des impacts sur le commerce international. De plus, la multiplication d'événements extrêmes induits par le changement climatique pourrait déstabiliser les flux commerciaux au sein de chaînes de valeurs globales¹⁵⁶ et avoir d'importants effets de contagion (exemple du séisme au Japon de 2011 et ses effets sur les flux commerciaux ainsi que sur l'industrie manufacturière américaine¹⁵⁷). Ainsi, l'estimation de l'OCDE d'une réduction des exportations mondiales de 1,8 % en 2060 à cause du changement climatique¹⁵⁸ pourrait constituer un minorant, puisque cette étude ne tient pas compte de ces effets indirects.

¹⁵⁰ Notamment dans les installations portuaires. Voir OCDE (2017), *Ibid.*

¹⁵¹ OCDE (2017), *Ibid.*

¹⁵² Attention, on parle ici en termes relatifs. Ce sont les pays relativement plus diversifiés et relativement moins touchés par le changement climatique qui verront des gains de balance commerciale grâce à une augmentation de leur avantage comparatif.

¹⁵³ OCDE (2017), *Ibid.*

¹⁵⁴ Carleton et Hsiang (2016), *Ibid.*

¹⁵⁵ OCDE (2017), *Ibid.*

¹⁵⁶ Voir (WTO-UNEP, 2009).

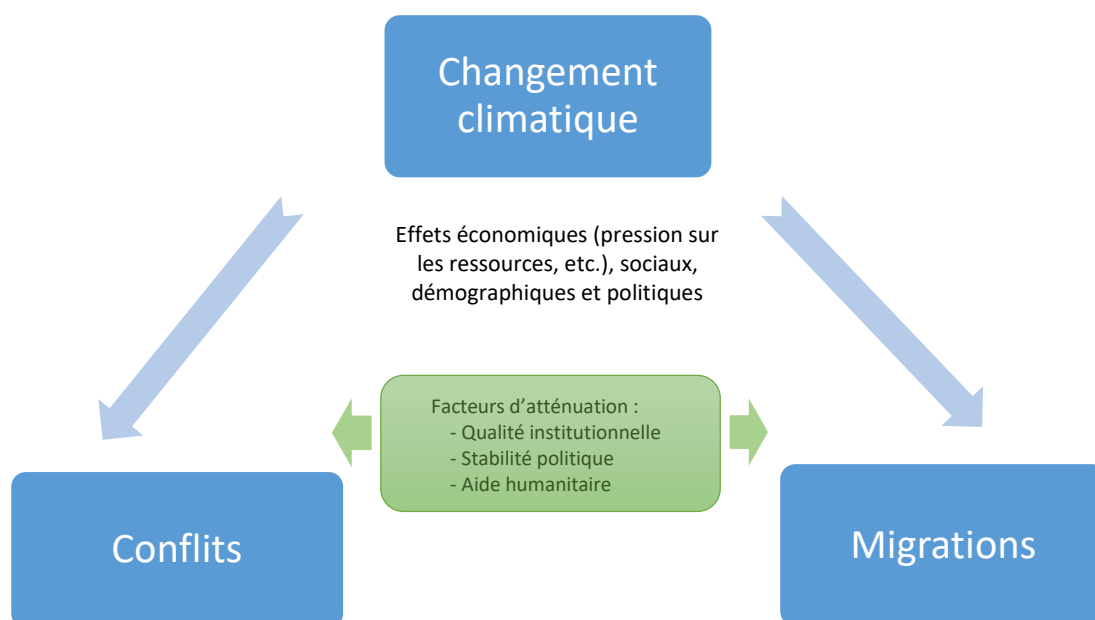
¹⁵⁷ Boehm *et al.* (2016).

¹⁵⁸ OCDE (2017), *Ibid.*

2.2.4 Instabilité politique

Si les effets du changement climatique sur les migrations et sur le risque de conflit semblent intuitifs, les résultats de la littérature empirique sont moins tranchés du fait de la complexité des liens entre ces trois facteurs (voir graphique 7) et les difficultés méthodologiques pour mettre en évidence des liens causaux. Une analyse récente (Abel, *et al.*, 2019) montre que ces liens entre les chocs climatiques, les migrations et les conflits ne seraient pas significatifs sur la période 2006-2015. Cependant les liens seraient significatifs en se restreignant à l'analyse empirique de la seule période 2010-2012. Cette période correspond en effet à la concomitance de flux migratoires importants de demandeurs d'asiles originaires de Syrie, des pays ayant connu le printemps Arabe, et de l'Afrique subsaharienne en proie à de nombreux conflits, ainsi que de nombreux épisodes de sécheresse. Si les auteurs n'attribuent pas directement ces épisodes au changement climatique, ils considèrent que les liens identifiés sont à interpréter dans le contexte du changement climatique, qui impliquerait une multiplication et une intensification de ce genre d'évènements climatiques extrêmes. En tout état de cause, cette analyse empirique est limitée par l'ampleur des chocs climatiques dont elle tient compte. Dans la mesure où les chocs s'amplifieraient au fur et à mesure du réchauffement climatique, les analyses empiriques pourraient trouver des liens de plus en plus forts entre ces différentes variables.

Graphique 7: Mécanismes schématisés de transmission entre changement climatique, conflits et migrations



Source : Auteurs, à partir de (Abel, *et al.*, 2019).

Changement climatique et migrations

Les estimations du nombre de personnes « déplacées » à cause du changement climatique d'ici 2050 varient de 250 millions à 1 milliard de personnes¹⁵⁹. L'ampleur de ces estimations peut notamment s'expliquer par le fait que les populations exposées aux risques d'érosion des côtes et de submersion sous l'effet de la hausse du niveau de la mer pourraient atteindre 1 milliard d'individus¹⁶⁰. D'autres conséquences du changement climatique telles que la dégradation des terres ou des réserves en eau douce seraient également des sources de déplacements¹⁶¹. Des mouvements de population d'une telle ampleur à l'intérieur des états ou entre les états constitueraient une source considérable d'instabilité politique.

¹⁵⁹ Par exemple: IOM (2008), "Climate Change and Migration: Improving Methodologies to Estimate Flows", *International Organization for Migrations*. Voir aussi le rapport 2017 du « Lancet countdown » :

[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(17\)32464-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(17)32464-9/fulltext)

¹⁶⁰ IPCC (2019), « Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate ».

¹⁶¹ IOM (2008), *Ibid.*

L'amplitude très forte de la fourchette d'estimation illustre les incertitudes quant aux effets du changement climatique sur les migrations. La diversité des résultats de la littérature empirique découle également de l'hétérogénéité des mesures et méthodes utilisées. En effet le changement climatique est soit mesuré *via* des changements de long terme (variation des températures, des précipitations, du niveau de la mer, etc.) ou des phénomènes de court terme telles que les catastrophes naturelles. Par ailleurs, la littérature montre que les migrations environnementales seraient le plus souvent au sein d'un même pays, mais les mobilités internes à un pays sont beaucoup plus difficiles à mesurer que les mobilités entre pays. En effet, les migrants privilégieraient généralement la proximité, aussi bien géographique que linguistique (voire culturelle). Ainsi, dans les pays développés comme dans les pays en développement, les flux migratoires qui surviennent après un évènement naturel extrême ont souvent lieu au sein du même pays, vers des destinations proches du lieu d'origine et localisées dans des zones urbaines. Étant donné la difficulté à mesurer les mobilités internes à un pays, la plupart des études utilisent la variation du taux d'urbanisation comme proxy de la migration interne.

L'impact du changement climatique sur les flux migratoires peut être difficile à mettre en évidence car les décisions de migrations sont souvent liées à plusieurs facteurs. De plus, le changement climatique peut avoir un effet indirect sur des facteurs démographiques, sociaux ou économiques qui ont à leur tour un effet sur la décision de migration (*cf.* graphique 5). Ainsi, une revue de la littérature de 53 études menées en Afrique montre qu'il est difficile empiriquement de mettre en évidence un lien direct entre le changement climatique et la migration (Borderon, *et al.*, 2019). Par ailleurs, les populations les plus concernées par le changement climatique, notamment en Afrique, n'ont pas toujours les ressources financières qui facilitent l'émigration (*trapped population*), en particulier sur d'autres continents. Enfin, certaines études montrent qu'une aide humanitaire ou gouvernementale dans les régions sinistrées par une catastrophe naturelle peut permettre de réduire les flux migratoires : par exemple, lors du Tsunami en 2004 dans l'océan indien, les flux migratoires ont été faibles grâce à l'aide humanitaire. À noter que ces analyses ne semblent pas appréhender le changement climatique en termes prospectifs en intégrant la problématique des risques qui n'ont jamais été observés jusqu'à aujourd'hui, comme de vastes zones peuplées devenant inhabitables (hausse du niveau de la mer, aridification extrême, etc.).

Changement climatique et conflits

Si la migration peut être un facteur d'adaptation face au changement climatique (en ayant par exemple des effets positifs sur la zone sinistrée *via* les transferts d'argent), elle est aussi souvent associée à l'émergence de conflits dans les pays d'accueil. Au niveau empirique, il est difficile d'isoler l'impact de la migration sur les conflits car les migrations environnementales augmentent les risques de conflit *via* plusieurs facteurs (productivité agricole ou économique, pressions démographiques, pressions psychologiques, etc.). Une méta-analyse sur 60 études quantitatives montre que le risque de conflit augmente avec la hausse des déviations des précipitations ou des températures moyennes (Hsiang, *et al.*, 2013). Une hausse d'un écart type en termes de températures ou de précipitations extrêmes augmenterait le risque de violence interpersonnelle et le risque de conflits intra-groupe¹⁶². À l'inverse, l'émigration ou les conflits ne sont pas inévitables suite à un choc environnemental, la solidité des institutions politiques apparaissant à cet égard comme un garde-fou important.

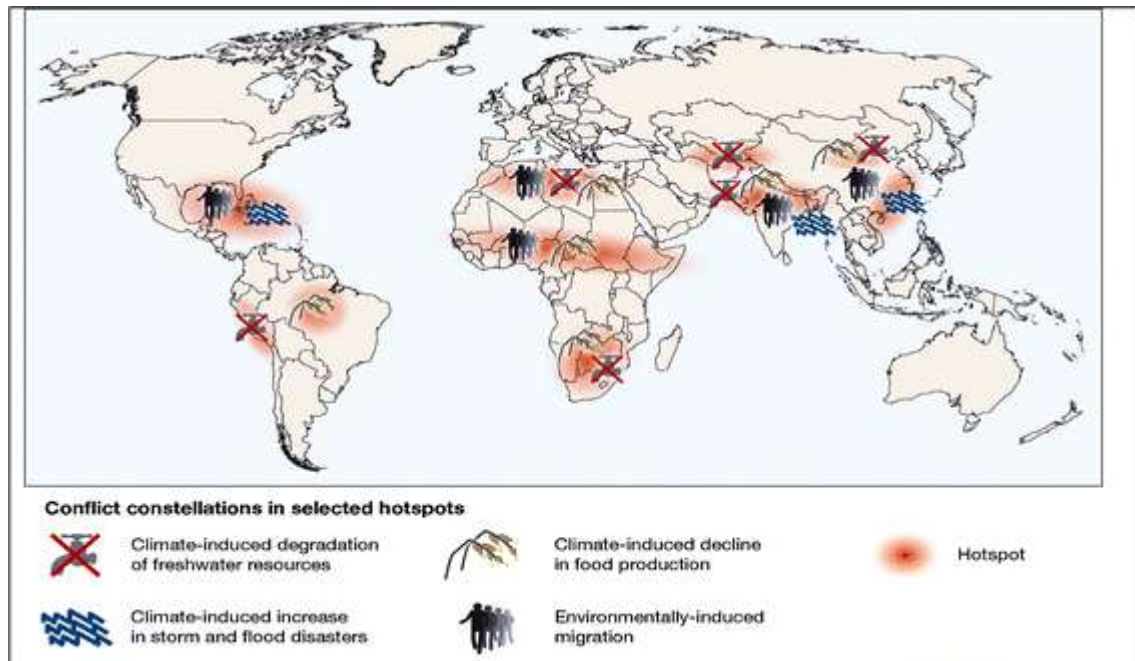
Si le changement climatique et ses effets négatifs en termes de dégradation des terres ou des réserves en eau douce disponibles n'apparaissent pas, à ce stade, comme seuls déterminants dans les conflits (Raleigh & Urdal, 2007), ils pourraient, en conjonction avec d'autres facteurs, exacerber les conflits dans le futur. Ainsi, une étude de 41 pays africains sur la période 1981-1999 montre que la variation des précipitations, *via* ses effets économiques (en diminuant le niveau du PIB/habitant) augmenterait la probabilité d'une guerre civile (Miguel & Sergenti, 2004). Enfin, la menace de plus en plus pressante que fait peser le changement climatique sur la sécurité des États peut s'observer indirectement par la multiplication récente des résolutions du Conseil de Sécurité des Nations Unies reconnaissant ces risques politiques¹⁶³. Le graphique 8 propose une cartographie des zones les plus vulnérables au changement climatique et qui pourraient devenir au fur et à

¹⁶² Hsiang *et al.* (2013), *Ibid.*

¹⁶³ *Cf.* UNSC : S/RES/2349 (relative au bassin du lac Tchad), S/PRST/2018/3 (relative à l'Afrique de l'Ouest et au Sahel), S/RES/2408 (relative à la Somalie), S/RES/2423 (relative au Mali), S/RES/2429 (relative au Darfour).

mesure du réchauffement des vecteurs d'instabilité régionale notamment en devenant des zones importantes d'émigration.

Graphique 8 : Zones les plus vulnérables au changement climatique et le plus susceptibles de devenir des sources d'émigration



Source : Warner *et al.* (2010).

Conclusion

Sous l'effet des émissions de gaz à effet de serre, le changement climatique devrait impliquer des bouleversements physiques très profonds : augmentation des températures moyennes et maximales, modification des régimes de précipitation, multiplication et intensification des événements météorologiques extrêmes, élévation du niveau de la mer, etc. Ces phénomènes physiques auraient des implications différenciées selon les régions du monde, mais constitueraient un enjeu de nature systémique sur la stabilité économique et politique.

Les vecteurs de transmission des phénomènes physiques aux systèmes socio-économiques sont multiples. On peut citer, entre autre, la baisse de la productivité du travail (réchauffement moyen, chaleurs extrêmes, etc.), la destruction d'infrastructures (événements climatiques extrêmes, élévation du niveau de la mer, etc.), ou une insécurité alimentaire accrue (assèchement des sols, accès à l'eau plus difficile, dégradation des écosystèmes, etc.).

L'évaluation quantitative des impacts économiques du changement climatique est soumise à de nombreuses difficultés méthodologiques. Une des plus importantes relève de l'évolution incertaine des capacités d'adaptation (ou de résilience) des sociétés au fur et à mesure de l'intensification des changements climatiques. De fortes incertitudes, relatives notamment à l'ampleur et à la vitesse du réchauffement climatique, rendent également difficile les exercices d'évaluation d'impacts.

Malgré ces difficultés méthodologiques, les outils et les travaux d'évaluation se sont multipliés ces dernières années. D'après les estimations recensées dans cette étude, sans intervention politique pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, le changement climatique causerait un dommage sur le PIB mondial compris entre 4 % et 30 % à horizon 2100. L'amplitude de cet intervalle illustre le degré d'incertitude entourant ces évaluations. Il convient de noter en outre que cette fourchette constitue sans doute un minorant de l'impact, car de nombreux effets ne sont pas pris en compte par les différents outils d'estimation, ou de manière très insatisfaisante.

En dépit des progrès récents des techniques d'estimation (effets de bouclage macroéconomique, renforcement des fondements empiriques des outils), des efforts seront indispensables à l'avenir pour améliorer la prise en compte (i) des coûts d'adaptation, (ii) des impacts des catastrophes naturelles, (iii) des effets indirects tels que l'instabilité politique et (iv) du caractère non linéaire de la dynamique d'apparition des dommages. Les analyses existantes sur ces effets (surtout qualitatives à ce stade), laissent pressentir que les outils actuels d'évaluation sous-estiment les dommages du changement climatique, et possiblement très largement.

Malgré les incertitudes évoquées, les productions scientifiques de ces dernières années dans le domaine des sciences climatiques et de l'économie du climat mettent en évidence, quasi unanimement, des risques pour la stabilité économique mondiale de plus en plus pressants et de plus en plus inquiétants en termes d'ampleur. Au-delà des débats sur la précision des chiffres, les résultats de la recherche actuelle ne peuvent que conduire au constat de la nécessité et de l'urgence d'accélérer la lutte contre le changement climatique.

En ligne avec les résultats du Rapport Stern de 2008, la littérature académique semble consensuelle sur le fait que les dommages qui seraient évités par les politiques de réductions des émissions dépassent de loin le coût généralement associé à ces politiques (autour de 1 % du PIB par exemple selon Stern¹⁶⁴). Compte tenu des risques d'irréversibilité et d'emballlement du système climatique anticipés par certains chercheurs, il pourrait également sembler approprié de considérer le coût des politiques de réduction d'émissions comme une prime d'assurance face à un scénario, qui n'est certes pas le plus probable, mais dont les conséquences économiques et sociales deviendraient incontrôlables. La mise en place de ces politiques d'atténuation doit passer par une prise en compte du coût social des émissions de GES et par une réduction volontariste de la

¹⁶⁴ Stern évalue que l'impact des politiques permettant de stabiliser la température à 2°C se situerait dans un intervalle compris entre -3,5 % et +1 % du PIB mondial à horizon 2050 avec une moyenne à -1 % (cf. (Stern, 2007)). Depuis le rapport Stern, l'OCDE a effectué de nouveaux travaux et estime que si les pays du G20 mettaient collectivement en place des politiques de réduction d'émission en ligne avec l'objectif des 2°C, ils gagneraient 2,8 % de PIB à horizon 2050 (OECD, 2017).

consommation d'énergies carbonées de source fossile, qui ne peut être efficace que sous la forme d'une action coordonnée au niveau mondial.

Enfin, il serait par ailleurs important de développer les évaluations d'impacts locaux de manière à identifier les zones prioritaires nécessitant des politiques plus volontaristes d'adaptation au changement climatique (renforcement des infrastructures et des institutions en charge de la gestion des risques par exemple). Outre les bénéfices économiques locaux de telles mesures (réduction des dommages futurs), il semble essentiel d'anticiper et de contenir les foyers potentiels de propagation d'instabilité économique et politique (par les échanges extérieurs, les marchés financiers ou les déplacements massifs de population).

Bibliographie

Abel G., Brottrager M., Cuaresma J. C. & R. Muttarak (2019), "Climate, conflict and forced migration", *Global Environmental Change*, Volume 54.

Acemoglu D., Johnson S. & J. Robinson (2002), "Reversal of fortune: geography and institutions in the making of the modern world income distribution", *The Quarterly Journal of Economics*, 117(4).

Ackerman F. & E. A. Stanton (2012), "Climate risks and carbon prices: revising the social cost of carbon", *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 2012(10).

Amengual A., Homar V., Romari R. & S. R. C. Alonso (2012), "Projections of the climate potential for tourism at local scales: application to Platja de Palma, Spain", *International Journal of Climatology*, Volume 32.

Atout France (2013), « *Panorama du tourisme de la montagne* », Édition 2012 / 2013 Cahier n° 2 : *Emploi et retombées économiques*. s.l., Collection Observation touristique.

Aubert M. et al. (2019), « Les groupes bancaires français face au risque climatique », *Analyse et synthèse, Banque de France*, Volume 101.

M. Auffhammer (2018), "Quantifying Economic Damages from Climate Change", *Journal of Economic Perspectives*, 32(4).

Bador M. et al. (2017), "Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate", *Environmental Research Letters*.

Banque de France (2019), « Verdir le système financier: la nouvelle frontière », *Revue de la Stabilité Financière*, Issue 23.

Batten S. (2018), "Climate change and the macro-economy: a critical review", *Bank of England Working Paper n° 706*.

Batten S., Sowerbutts R. & M. Tanaka (2016), "Let's talk about the weather: the impact of climate change on central banks", *Bank of England Working Paper n° 603*.

Belcher S., Boucher O. & R. Sutton (2019), "Why results from the next generation of climate models matter", *Carbon Brief Guest post 21 March*.

Boehm C. E., Aaron F. & P.-N. Nitya (2016), "The Role of Global Supply Chains in the Transmission of Shocks: Firm-Level Evidence from the 2011 Tōhoku Earthquake", Washington: Board of Governors of the Federal Reserve System.

Borderon M. et al. (2019), "Migration influenced by environmental change in Africa: a systematic review of empirical evidence", *Demographic Research*, 41(18).

Bosello F., Eboli F. & R. Pierfederici (2012), "Assessing the economic impacts of climate change. An updated CGE point of view", *FEEM working paper n°2*.

Bosello, F. & R. Parrado (2014), "Climate Change Impacts and Market Driven Adaptation: the Costs of Inaction Including Market Rigidities", *Nota di Lavoro 64*.

Burke M., Davis M. W. & N. S. Diffenbaugh (2018), "Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets", Volume 557.

Burke M., Hsiang S. M. & E. Miguel (2015), "Global non-linear effect of temperature on economic production", *Nature*, Volume 527.

Burke M. & V. Tanutama (2019), "Climatic constraints on aggregate economic output", *NBER Working Paper Series n° 25779*.

- Carleton T. A. & S. M. Hsiang (2016), "Social and economic impacts of climate", *Science*, 353(6304).
- Ciscar J. e. a. (2014), "Climate Impacts in Europe. The JRC PESETA II Project", s.l.: *JRC Scientific and Policy Reports*, EUR 26586EN.
- Costanza R., Hart M., Posner S. & J. Talberth (2009), "Beyond GDP: The need for new measures of progress", *The Pardee Papers* n° 4.
- I. Dallmann (2019), "Weather variations and international trade", *Environmental and Resource Economics*, 72(1).
- D'Arge R. (1975), "Economic and Social Measures of Biologic and Climatic Change", *Climate Impact Assessment Program, Institute for Defense Analyses (prepared for the U.S. Department of Transportation)*.
- De Brin K. C., Dellink R. B. & R. S. Tol (2009), "AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model", *Climate Change*, 95(1-2).
- Dellink R., Hwang H., Lanzi E. & J. Chateau (2017), "International trade consequences of climate change", *OECD Trade and Environment Working Papers*.
- Dell M., Jones B. F. & B. A. Olken (2012), "Temperature shocks and economic growth: evidence from the last half century", *American Economic Journal: Macroeconomics* 4, Volume 3.
- Dell M., Jones B. F. & B. A. Olken (2014), "What do we learn from weather? The new climate-economy literature", *Journal of Economic Literature*, 52(3).
- Deryugina T. & S. Hsiang (2014) "Does the Environment still Matter? Daily Temperature and Income in the United States", *NBER Working Paper* n° 20750.
- Deryugina T. & S. Hsiang (2017), "The marginal product of climate", *NBER Working paper*, Issue 24072.
- Deschênes O. & E. Moretti (2009), "Extreme weather events, mortality, and migration", *The Review of Economics and Statistics*, 91(4).
- Deutsch C. et al. (2018), "Increase in crop losses to insect pests in a warming climate", *Science*, 361(6405).
- DOE (2013), *U.S. Energy Sector Vulnerabilities to Climate Change and Extreme Weather*, s.l.: US Department of Energy, DOE/PI-0013.
- Drake B., González-Meler M. & S. Long (1997), "More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂", *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Volume 48.
- European Environment Agency, (2019), "Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe", *EEA report* n° 04.
- S. Fankhauser (1995), "Protection versus retreat: the economic costs of sea-level rise", *Environment and Planning A: Economy and Space*, 27(2).
- Fankhauser S. (1995), "Valuing climate change: the economics of the greenhouse", *London: Earthscan*.
- Fisher-Vanden K. & I. S. Wing (2013), "Confronting the challenge of integrated assessment of climate adaptation: a conceptual framework", *Climate Change*, 117(3).
- Fisher-Vanden K., Wing I. S., Lanzi E. & Popp D. (2013), "Modeling climate change feedbacks and adaptation responses: recent approaches and shortcomings", *Climate Change*, 117(3).
- Fonds Monétaire International (2017), *World Economic Outlook*, Washington", DC: International Monetary Fund.
- N. Gregory (2010), "How climatic changes could affect meat quality", *Food Research International*, 43(7).

Guo Y. *et al.* (2014), "Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation", *Epidemiology*, 25(6).

Hallegatte S. *et al.* (2016), "*Shock Waves: Managing the Impacts of Climate Change on Poverty*", Washington, DC: World Bank.

Haraguchi M. & U. Lall (2015), "Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 14.

Heal G. & J. Park (2016), "Temperature stress and the direct impact of climate change: a review of an emerging literature", *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(2).

P. Howard (2014), "*Omitted Damages, What's Missing From the Social Cost of Carbon*", s.l.: s.n.

P. Howard (2014), "*Omitted Damages: What's Missing From the Social Cost of Carbon*", Available at <http://costofcarbon.org/reports/entry/omitted-damages-whats-missing-from-the-social-cost-of-carbon> The Cost of Carbon Pollution Project.

Howard P. & T. Sterner (2014), "*Loaded DICE: refining Meta-analysis approach to calibrating*", Minneapolis, Minnesota, Agricultural and Applied Economics Association.

Howard P. & T. Sterner (2014), "*Loaded DICE: Refining the Meta-analysis Approach to Calibrating Climate Damage Functions*", Minneapolis, Minnesota, Agricultural and Applied Economics Association. Annual Meeting, July 27-29.

Howard P. & T. Sterner (2017), "Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates", *Environmental and Resource Economics*, 68(1).

Howard P. & D. Sylvan (2015), "Expert consensus of the economics on climate change", *Institute for Policy Integrity*.

Hsiang & Kopp (2018), "An economist's guide to climate change science", *Journal of Economic Perspectives*.

S. Hsiang (2016), "Climate econometrics", *Annual review of resource economics*, Volume 8.

Hsiang S. Burke M. & E. Miguel (2013), "Quantifying the influence of climate on human conflict", *Science*, Volume 341.

Hsiang S. & D. Narita (2012), "Adaptation to cyclone risk: evidence from the global cross-section", 3(2).

Hsiang S., Oliva P. & R. Walker (2018), "The distribution of environmental damages", *NBER Working Paper Series* n° 23882.

IEA (2018), "*The future of cooling. Opportunities for energy-efficient air conditioning*", s.l.: Technology report.

IEA (2019), "*World energy outlook*", s.l.: International Energy Agency.

ILO (2019), "*Working on a warmer planet, the impact of heat stress on labour productivity and decent work*", Geneva: ILO.

IPBES (2019), "*Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service*", s.l.: s.n.

IPCC (2014), "*Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*", Geneva: Meyer (Eds.).

IPCC (2018), "*Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*", Switzerland: Waterfields (eds).

IPCC (2019), "*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*", s.l.: In Press.

Knox J., Hess T., Daccache A. & T. Wheeler (2012), "Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia", *Environmental Research Letters*, 7(3).

Kopp R., Shwom R., Wagner G. & J. Yuan (2016), "Tipping elements and climate-economic shocks: Pathways toward integrated assessment", *Earth's Future*.

Kukul M. & S. Irmak (2018), "Climate-Driven Crop Yield and Yield Variability and Climate Change Impacts on the U.S. Great Plains Agricultural Production", *Nature*, Volume 8.

Lauric T. et al. (2019), "Escaping the perfect storm of simultaneous climate change impacts on agriculture and marine fisheries", *Science Advances*, 5(11).

Lemmen D. & F. Warren (2004), "*Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective*", Ottawa: Natural Resources Canada.

T. M. Lenton (2011), "Early warning of climate tipping points", *Nature Climate Change*, 1(4), pp. 201-209.

Lenton T. et al. (2019), "Climate tipping points - too risky to bet", *Nature*, Issue 575 .

Linnerud K., Mideksa T. & G. Eskeland (2011), "The impact of climate change on nuclear power supply", *The Energy Journal*, 32(1).

Lobell D. & S. Gourджи (2012), "The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity", *Plant Physiology*, 160(4).

A. Maximilian (2018), "Quantifying economic damages from climate change", *Journal of Economic Perspectives*, 32(4).

Mejia S. et al. (2018), "The Effects of Weather Shocks on Economic Activity: What are the Channels of Impact?", *IMF Working Papers*, Volume 18/144.

Mendelsohn R., Nordhaus W. & D. Shaw (1994), "The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis", *American Economic Review*, 84(4).

Mideksa T. & S. Kallbekken (2010), "The impact of climate change on the electricity market: a review", *Energy Policy*, 38(7).

Miguel E. & E. Sergenti (2004), "Economic shocks and civil conflict: an instrumental variables approach", *Journal of Political Economy*, 112(41).

F. Millerd (2011), "The potential impact of climate change on Great Lakes international shipping", *Climatic Change*, 104(3-4).

Moore F. C. & D. Diaz (2017), "Quantifying the economic risks of climate change", *Nature Climate Change*, Volume 7.

Moore F. C. & C. D. Kolstad (2019), "Estimating the economic impacts of climate change using weather observations", *NBER Working paper n° 25537*.

Moore F. C. & D. B. Lobell (2015), "The Fingerprint of Climate Trends on European Crop Yields", *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 112(9).

Moore F. & D. Diaz (2015), "Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy", *Nature Climate Change*.

Mora C. et al. (2017), "Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*".

Müller C. & R. Robertson (2014), "Projecting future crop productivity for global economic modeling", *Agricultural Economics*, 45(1).

Re Munich (2005), "*Weather Catastrophes and Climate Change: Is There Still Hope for Us?*", s.l.: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft.

- Nordas R. & N. P. Gleditsch (2007), "Climate change and conflict", *Political Geography*, 26(6).
- W. Nordhaus (1994), "Expert opinion on climate change", *American Scientist*.
- W. Nordhaus (2008), "A question of balance, weighing the options on global warming policies", s.l.:Yale University Press.
- W. Nordhaus (2011), "The Economics of Tail Events with an Application to Climate Change", *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(2), pp. 240-257.
- W. Nordhaus (2012), "Economic policy in the face of severe tail events", *Journal of public economic theory*, 14(2).
- W. Nordhaus (2013), "*The climate casino: risk, uncertainty and economics for a warming world*", Yale University Press éd. s.l.:s.n.
- W. Nordhaus (2016), "Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies", *NBER Working Paper* n° 22933.
- Nordhaus W. & J. Boyer (2000), "Warming the world, economic models of global warming", s.l.: MIT Press.
- Nordhaus W. & P. Sztorc (2013), "DICE 2013R: Introduction and User's Manual", available from at <http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/>.
- OCDE (2016), « Les conséquences économiques du changement climatique », Paris : Éditions OCDE.
- R. Pindyck (2010), "Fat tails, thin tails, and climate change policy", *NBER Working paper* 16353.
- Raleigh C. & H. Urdal (2007), "Climate change, environmental degradation and armed conflict", *Political Geography*, 26(6).
- Rodrick D., Subramnian A. & F. Trebbi (2004), "Institutions rule: the primacy of institutions over geography and integration in economic development", *Journal of economic growth*, 9(2).
- Roson R. & D. van der Mensbrugge (2012), "Climate change and economic growth: impacts and", *Int. J. Sustainable Economy*, 4(3).
- Sénat, n.d. « Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée », *Rapport d'information* n° 511, p. 2019.
- Smith M. & S. Myers (2018), "Impact of anthropogenic CO2 emissions on global human nutrition", *Nature Climate Change*, Volume 8.
- Steffen W. et al. (2018), "Trajectories of the Earth System in the Anthropocene", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33).
- N. Stern (2007), "*The Economics of Climate Change: The Stern Review*", s.l.: Cambridge University Press.
- N. Stern (2013), "The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models", *Journal of Economic Literature*.
- Stiglitz J. E., Sen A. & J.-P. Fitoussi (2009), "The Measurement of Economic Performance and Social Progress Revisited : Reflections and Overview", *OFCE Working Documents* n° 33.
- Stoerk T., Wagner G. & R. Ward (2018), "Recommendations for improving the treatment of risk and uncertainty in economics estimates of climate impacts in the sixth intergovernmental panel on climate change assessment report", *Review of environmental economics and policy*, 12(2), pp. 371-376.
- Szewczyk W., Ciscar J., MOngeelli I. & A. Soria (2018), "*JRC PESETA III project: Economic integration and spillover analysis*", Luwembourg: Publications Office of the European Union.

W. e. a. Szewczyk (2018), "*JRC PESETA III project: Economic integration and spillover analysis*", s.l.: EUR 29456 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

The Global Food Security (2015), "*Extreme weather and resilience of the global food system*", UK: Final Project Report from the UK-US Taskforce on Extreme Weather and Global Food System Resilience.

The Government Office for Science (2011), "*Foresight migration and global environmental change*", London: s.n.

R. S. Tol (2009), "The economic effects of climate change", *Journal of economic perspectives*, 23(2).

R. S. Tol (2014), "Correction and update: the economic effects of climate change", *Journal of Economic Perspectives*, 28(2).

Van Den Bergh J. C. & W. Botzen (2015), "Monetary valuation of the social cost of CO2 emissions: A critical survey", *Ecological Economics*, Volume 114.

Warner K. et al. (2010), "Climate change, environmental degradation and migration", *Natural Hazards*, 55(3), pp. 689-715.

M. Weitzman (2011), "Fat-Tailed Uncertainty in the Economics of Catastrophic Climate Change", *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(2), pp. 275-292.

M. L. Weitzman (2009), "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change", *The Review of Economics and Statistics*.

M. L. Weitzman (2012), "GHG targets as insurance against catastrophic climate damages", *Journal of Public Economic Theory*.

Weitzman M. & G. (Wagner 2015), "*Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet*", 1st éd. s.l.:Princeton University Press.

Wenz L. & A. Levermann (2016), "Enhanced economic connectivity to foster heat stress-related losses", *Science Advances*, 2(6).

Wiebe K. et al. (2015), "Climate change impacts on agriculture in 2050 under a range of plausible socioeconomic and emissions scenarios", *Environmental Research Letters*, 10(8).

WTO-UNEP (2009), "*Trade and climate change*" s.l.: WTO-UNEP Report.

Zivin J. G. & M. Neidell (2014), "Temperature and the allocation of time: implications for climate change", *Journal of Labor Economics*, 32(1).

Annexe 1 : Risques les plus prégnants liés aux impacts du changement climatique selon le Giec

Le Giec a identifié les huit risques suivants associés au changement climatique comme étant les plus prégnants et préoccupants compte tenu des vulnérabilités sociales et géographiques¹⁶⁵ :

- i. Risque de hausse de la mortalité, de développement de maladies et menace sur les moyens de subsistance dans les zones côtières basses, les petits États insulaires en développement et autres petites îles en raison de la multiplication des tempêtes, des inondations côtières et de la montée du niveau de la mer ;
- ii. Risque de graves problèmes de santé et menace sur les moyens d'existence de larges communautés urbaines en raison des inondations intérieures dans certaines régions ;
- iii. Risques systémiques dus à des phénomènes météorologiques extrêmes entraînant une défaillance des réseaux d'infrastructures et des services essentiels tels que l'électricité, l'approvisionnement en eau, les services de santé et d'urgence ;
- iv. Risque de mortalité et de morbidité en période de chaleur extrême, en particulier pour les populations urbaines vulnérables et celles qui travaillent à l'extérieur dans les zones urbaines ou rurales ;
- v. Risque d'insécurité alimentaire et d'effondrement des systèmes alimentaires lié au réchauffement, à la sécheresse, aux inondations, à la variabilité et aux maximales des précipitations, en particulier pour les populations pauvres des zones urbaines et rurales ;
- vi. Risque de perte de moyens de subsistance et de revenus en milieu rural en raison d'un accès insuffisant à l'eau potable et à l'irrigation et d'une productivité agricole réduite, en particulier pour les agriculteurs et les éleveurs ayant un capital minimal dans les régions semi-arides ;
- vii. Risque de perte des écosystèmes marins et côtiers, de la biodiversité et des biens, fonctions et services écosystémiques qu'ils fournissent pour les moyens de subsistance côtiers, en particulier pour les communautés de pêcheurs des régions tropicales et de l'Arctique ;
- viii. Risque de perte des écosystèmes terrestres et des eaux intérieures, de la biodiversité et des biens, fonctions et services écosystémiques qu'ils fournissent pour les moyens de subsistance.

¹⁶⁵ O'Neill et al. (2017), "IPCC reasons for concern regarding climate change risks", *Nature Climate Change*.

Annexe 2 : Types d'impacts modélisés dans le rapport de l'OCDE de 2016

Catégories d'impacts climatiques considérés dans cette étude

Agriculture	Modification du rendement des cultures (y compris la productivité des terres agricoles et le stress hydrique)	Modélisé
	Mortalité et morbidité des animaux d'élevage dues à l'exposition à la chaleur et au froid	Év. qualitative Év. indépendante
	Modification de la productivité des pâturages et des terres de parcours	Év. qualitative
	Modification de la productivité de l'aquaculture	Modélisé
	Modification des prises de poissons	Modélisé
Zones côtières	Perte de terres et de capital due à l'élévation du niveau de la mer	Modélisé
	Impacts non marchands sur les zones côtières	Év. qualitative
Phénomènes extrêmes	Mortalité, dommages causés à la terre et au capital par les ouragans	Modélisé
	Mortalité, dommages causés à la terre et au capital par les inondations	Év. indépendante
Santé	Mortalité due à l'exposition à la chaleur (y compris canicules)	Év. indépendante modélisé
	Morbidité due à l'exposition à la chaleur et au froid (y compris canicules)	Modélisé
	Mortalité et morbidité dues aux maladies infectieuses, cardio-vasculaires et respiratoires	Modélisé
Demande d'énergie	Modification de la demande d'énergie à des fins de refroidissement et de chauffage	Modélisé
Demande de services touristiques	Modification des flux et des services touristiques	Modélisé
Écosystèmes	Perte d'écosystèmes et de biodiversité	Év. indépendante
	Modification des rendements des plantations forestières	Év. qualitative
Stress hydrique	Modification de l'offre d'énergie	Év. qualitative
	Modification des quantités d'eau potable disponibles pour les utilisateurs finaux (y compris les ménages)	Év. qualitative
Sécurité humaine	Troubles civils	Év. qualitative
	Migrations humaines	Év. qualitative
Points de basculement	Événements perturbateurs de grande envergure	Év. indépendante

Note : « Modélisé » signifie que l'impact est capturé (au moins partiellement) par le cadre de modélisation principal ; « év. indépendante » fait référence à une évaluation quantitative à l'extérieur du cadre de modélisation principal ; et « év. qualitative » indique que seule une évaluation qualitative a été possible dans ce rapport.

Source : Compilation effectuée pour cette analyse.

Source : OCDE (2016), *Ibid.*

**Annexe 3 : Études ayant servies à la revue de littérature des dommages au niveau mondial
(sources et représentation graphique)**

Tableau 1. Ensemble des études recensées par les auteurs ayant servies à la revue de littérature et les résultats présentés en partie 1.2.1

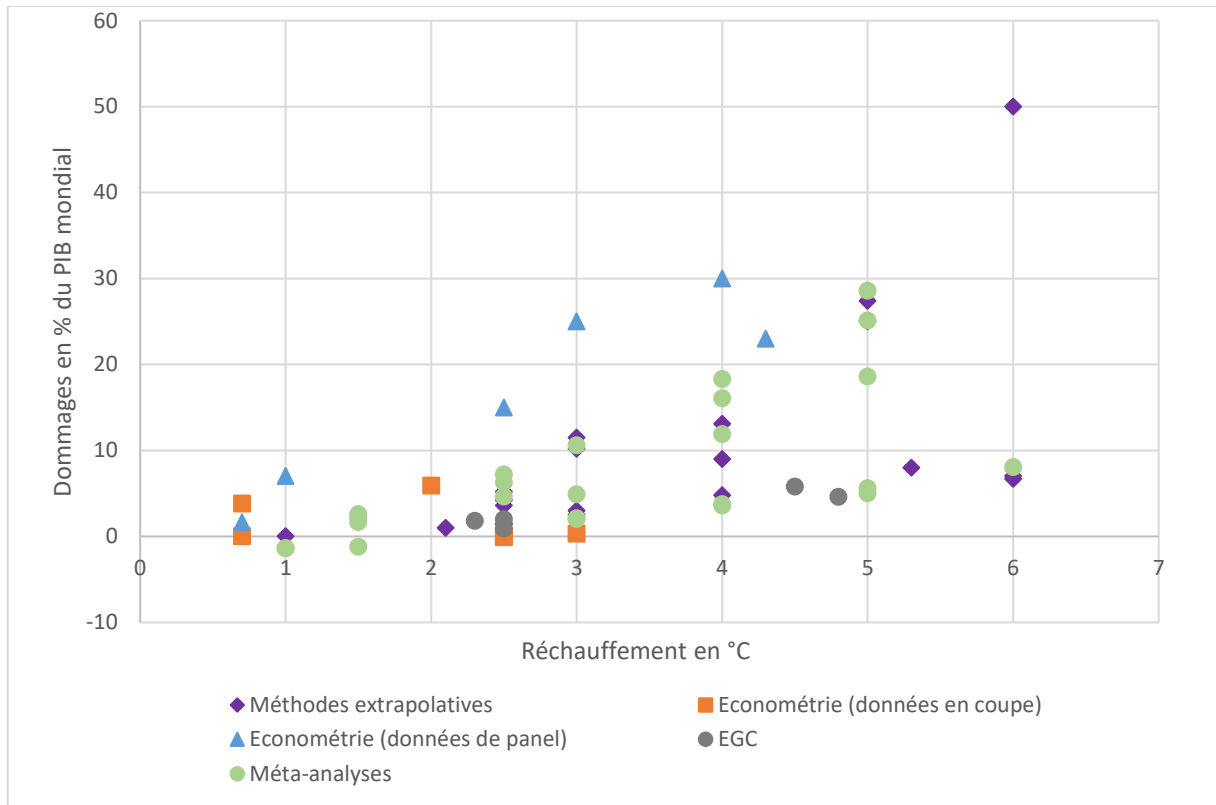
Étude	Réchauffement (°C)	Domage (%)	Méthodologie	Provenance
Weitzman (2012)	6	50	approche températures extrêmes	HS
	4	9	approche températures extrêmes	projection
	5	25	approche températures extrêmes	projection
Ackerman <i>et al.</i> (2012) adjusting Hanemann (2008)	5	27,4	approche températures extrêmes	projection
	4	13,1	approche températures extrêmes	projection
	2,5	4,2	approche températures extrêmes	HS
Burke <i>et al.</i> (2018)	1	7	données de panel	ajout
	2,5	15	données de panel	ajout
	3	25	données de panel	ajout
	4	30	données de panel	ajout
Burke <i>et al.</i> (2015)	4,3	23	données de panel	HS
Ng et Zhao (2011)	0,7	1,6	données de panel	HS
Bluedorn (2009)	2	5,9	données en coupe	ajout
	0,7	0	données en coupe	HS
Mendelsohn <i>et al.</i> (2000)	2,5	0	données en coupe	HS
	2,5	-0,1	données en coupe	HS
Nordhaus (2008b)	3	0,3	données en coupe	ajout
Horowitz (2009)	0,7	3,8	données en coupe	HS
Roson and van der Mensbrugge (2012)	4,8	4,6	MEGC	HS
	2,3	1,8	MEGC	HS
Bosello and Parrado (2014)	2,5	0,9	MEGC	HS
OCDE (2016)	4,5	5,8	MEGC/MEI	ajout
	2,5	2	MEGC	ajout
Fankhauser (1995)	2,5	1,4	méthode énumérative	HS
Nordhaus (2008a)	2,1	1	méthode énumérative	HS
	3	2,5	méthode énumérative	projection
	4	4,8	méthode énumérative	projection
Nordhaus (2007)	3	3	méthode énumérative	ajout
	5,3	8	méthode énumérative	ajout
Nordhaus (1999)	2,5	1,5	méthode énumérative	ajout
	6	7	méthode énumérative	ajout
Meyer and Cooper (1995)	3	11,5	méthode énumérative	HS
Nordhaus (1994b)	2,5	3,6	entretien d'experts	HS
	6	6,7	entretien d'experts	HS
Schauer (1995)	2,5	5,2	entretien d'experts	HS
Howard and Sylvan (2015)	3	10,2	entretien d'experts	HS
	1	0	entretien d'experts	HS

Howard et Sterner (2017)	1,5	2,6	méta-analyse	ajout
	2,5	7,2	méta-analyse	projection
	4	18,3	méta-analyse	projection
	5	28,6	méta-analyse	projection
	1,5	2,3	méta-analyse	ajout
	2,5	6,3	méta-analyse	projection
	4	16,1	méta-analyse	projection
	5	25,1	méta-analyse	projection
	1,5	1,7	méta-analyse	ajout
	2,5	4,65	méta-analyse	projection
	4	11,9	méta-analyse	projection
	5	18,6	méta-analyse	projection
Tol (2009)	1	-1,36	méta-analyse	ajout
	1,5	-1,2	méta-analyse	projection
Tol (2018)	1	-1,4	méta-analyse	Actualisation de HS
	5	5	méta-analyse	projection
	4	3,75	méta-analyse	projection
Nordhaus (2014)	3	10,6	méta-analyse	HS
	3	4,9	méta-analyse	HS
Nordhaus (2016)	5	5,6	méta-analyse	ajout
	4	3,6	méta-analyse	ajout
	3	2,1	méta-analyse	ajout
Moffat (2017)	3	2	méta-analyse	ajout
	6	8,1	méta-analyse	ajout

Note : « HS » dans la colonne « Provenance » signifie que les résultats ont été tirés de Howard et Sterner (2017), *Ibid*. Dans cette même colonne, « Projection » signifie que le résultat a été rajouté en utilisant la fonction de dommage produite par l'étude. Certaines études¹⁶⁶ ne s'intéressent pas à des fonctions de dommages complètes mais seulement à des estimateurs de dommages précis correspondant à certains niveaux de réchauffements. Les études surlignées en vert dans le tableau correspondent aux estimations de dommages reprises dans le graphique 2 en partie 1.2.1 (seules les études postérieures à 2008 ont été gardées, et les méta-analyses ont été exclues).

¹⁶⁶ Par exemple : Ng et Zhao (2011), Nordhaus (2008b), Bluedorn (2009), Horowitz (2009) etc.

Graphique 9 : Estimations recensées par les auteurs des dommages quantifiables du changement climatique sur l'activité au niveau mondial (cf. Tableau 1)



Note de lecture : Chaque point représente les estimateurs de dommages d'une étude en fonction du réchauffement et de la méthodologie employée. Par exemple, un carré orange représente l'estimation de l'impact économique du changement climatique en % du niveau de PIB en fonction du réchauffement moyen en °C au niveau mondial d'une étude économétrique utilisant des données en coupe. Attention ce graphique ne prétend pas à l'exhaustivité et il faut noter que de nombreux effets du changement climatique ne sont pas évalués dans ces estimations (cf. partie 1.3).

Sources : Les résultats représentés sur ce graphique proviennent d'études identifiées par Howard et Sterner (2017), d'autres études identifiées par les auteurs (en particulier postérieures à Howard et Sterner¹⁶⁷), et d'extrapolation à partir des fonctions de dommage trouvées dans l'ensemble des études citées.

¹⁶⁷ Par exemple, Burke et al. (2018), « Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets », *Nature*.

Tableau 2 : Revue des résultats par type de méthodologie

Méthodologie	Scénarios de réchauffement (en °C) pris en compte	Intervalle des estimateurs de dommages (% de PIB)
Approche énumérative	entre 1 et 3°C	entre +2,3 % et -11,5 %
Données en Coupe	entre 0,7 et 3,2°C	entre +0,1 % et -16,3 %
Modélisation EGC	entre 1,5 et 4,8°C	entre -0,2 % et -5,8 %
Données de panel et approches hybrides	entre 0,7 et 4,3°C	entre -1,6 % et -30 %
Approche par Entretiens d'Experts	entre 1 et 6°C	entre 0 % et -10,2 %
Approche aux températures extrêmes	entre 1 et 6°C	entre -1 % et -50 %
Méta-analyse	entre 1 et 6°C	entre +1,4 % et -40 %

Source : Howard et Sterner (2017) complété par les auteurs.

Référence des études listées dans le tableau :

Ackerman et Stanton (2012), "Climate Risks and Carbon Prices: Revising the Social Cost of Carbon".

Bluedorn *et al.* (2009), "The long-lived effects of historic climate on the wealth of nations", *Society for Economic Dynamics Meeting Papers*.

Bosello et Parrado (2014), "Climate change impacts and limited market-driven adaptation", *Review of Environment, Energy and Economics*.

Burke *et al.* (2015), "Global non-linear effect of temperature on economic production", *Nature*.

Burke *et al.* (2018), "Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets", *Nature*.

Fankhauser (1995), "Valuing climate change: the economics of the greenhouse", *Earthscan*.

Hanemann (2008), "What is the economic cost of climate change?", *University of California, Berkeley*.

Horowitz (2009), "The income-temperature relationship in a cross-section of countries and its implications for predicting the effects of global warming", *Environmental and Resource Economics*.

Howard et Sterner (2017), "Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates", *Environmental and Resource Economics*.

Howard et Sylvan (2015), "Expert Consensus on the Economics of Climate Change", *Institute for Policy Integrity*.

Mendelsohn *et al.* (2000), "Comparing impacts across climate models", *Integrated Assessment*.

Meyer et Cooper (1995), "A recalculation of the social costs of climate change". *The Ecologist*.

Ng et Zhao (2011), "No matter how it is measured, income declines with global warming". *Ecological Economics*.

Nordhaus (2008a), "A question of balance: weighing the options on global warming policies", *Yale University Press*.

Nordhaus (1994), "Expert opinion on climate change », *Am Sci*.

Nordhaus (1999), "Roll the DICE Again: The Economics of Global Warming", *Yale University*.

Nordhaus (2007), "The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy", *Yale University*.

Nordhaus (2008b), "New metrics for environmental economics: Gridded economic data", *Integrated Assessment*.

Nordhaus (2014), "Estimates of the social cost of carbon: concepts and results from the DICE-2013R model and alternative approaches". *Environmental and Resource Economics*.

Nordhaus (2016), "Projections and Uncertainties About Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies", *NBER Working Paper*.

Nordhaus et Moffat (2017), "A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis", *NBER Working Paper*.

OCDE (2016), « Les conséquences économiques du changement climatique », *Éditions OCDE*.

Roson et Mensbrugge (2012), "Climate change and economic growth: impacts and interactions", *International Journal of Sustainable Economy*.

Schauer (1995), "Estimation of the greenhouse gas externality with uncertainty", *Environmental and Resource Economics*.

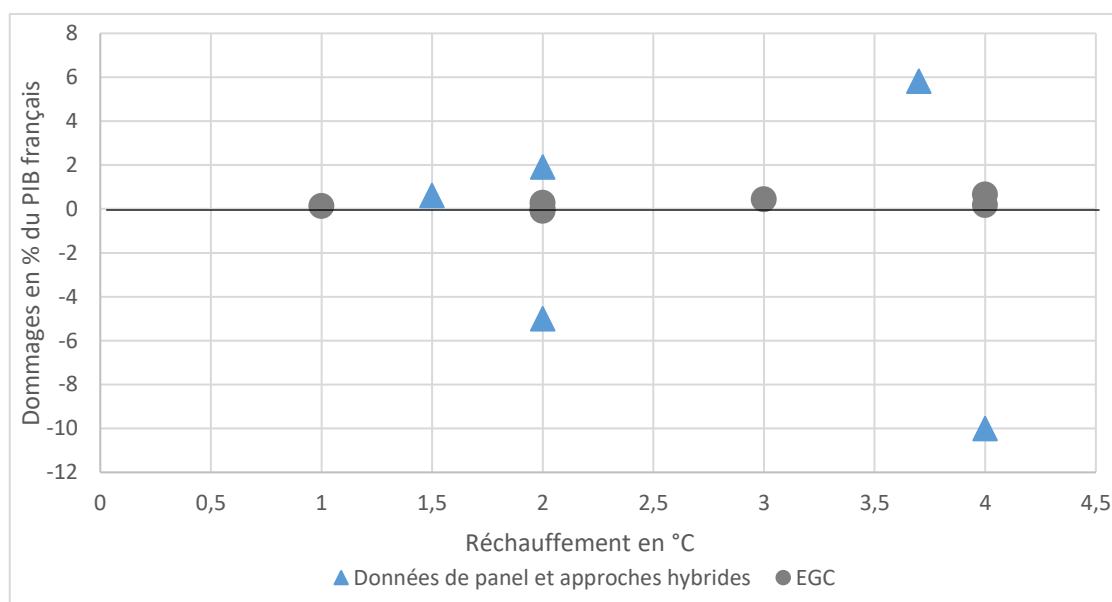
Tol (2018), "The Economic Impacts of Climate Change", *Review of Environmental Economics and Policy*.

Tol (2009), "The Economic Effects of Climate Change", *Journal of Economic Perspectives*.

Weitzman (2012), "GHG targets as insurance against catastrophic climate damages" *Journal of Public Economic Theory*.

Annexe 4 : Estimations recensés par les auteurs des dommages du changement climatique sur le PIB français

Graphique 10 : Dommages estimés des impacts du changement climatique sur le PIB français



Note de lecture : Chaque point représente les estimateurs de dommages d'une étude en fonction du réchauffement et de la méthodologie employée. Par exemple, un rond gris représente l'estimation de l'impact économique du changement climatique en % du niveau de PIB en fonction du réchauffement moyen en °C au niveau mondial d'une étude utilisant un MEGC.

Sources : Les résultats représentés sur ce graphique proviennent d'études identifiées par les auteurs. Elles sont listées dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Ensemble des études recensées par les auteurs concernant les dommages estimés sur le PIB français

Étude	Réchauffement (°C)	Dommage (%)	Méthodologie	Provenance
Kahn <i>et al.</i> (2019)	1,5	0,62	données de panel	ajout
	2	1,92	données de panel	ajout
	3,7	5,82	données de panel	ajout
Burke <i>et al.</i> (2015)	2	-5	données de panel	ajout
	4	-10	données de panel	ajout
Lafakis <i>et al.</i> (2019)	2	-0,08	MEGC	ajout
Kompas <i>et al.</i> (2019)	1	0,139	MEGC	ajout
	2	0,285	MEGC	ajout
	3	0,455	MEGC	ajout
	4	0,662	MEGC	ajout
Aeheim <i>et al.</i> (2012)	2	0	MEGC	ajout
	4	0,18	MEGC	ajout

Notes:

Aeheim *et al.* (2012) prend en compte dans un même ensemble la France, la Belgique, le Luxembourg et les Pays-Bas.

Les résultats de Kompas *et al.* (2018) sont ceux les impacts économiques sur le PIB à long-terme (200 ans) des différents scénarios du Giec (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5) en utilisant un MEGC.

Références listées dans le tableau :

Aeheim *et al.* (2012), "Impacts and adaptation to climate change in European economies", *Global Environmental Change*.

Burke *et al.* (2015), "Global non-linear effect of temperature on economic production", *Nature*.

Kahn *et al.* (2019), "Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis", *NBER Working Papers*.

Kompas *et al.* (2018), "The Effects of Climate Change on GDP by Country and the Global Economic Gains from Complying with the Paris Climate Accord", *Earth's Future*.

Lafakis *et al.* (2019), "The Economic Implications of Climate Change", *Moody's Analytics*.