



Note technique

Mise à plat méthodologique de la révision de l'objectif d'émissions moyennes par personne à l'échelle mondiale en 2050.

Cette note a été réalisée par la 2tonnes Compagnie - tous droits réservés.

Auteurs : Talalkhokh Mathis, Laugier François
Date : 20 mars 2024

Table des matières

Introduction	3
Contexte	3
Les 2 tonnes, une notion émergente depuis quelques années	3
Une première étude réalisée en 2021 par 2tonnes	3
Démarche	4
Avant de commencer	5
Référence aux travaux du GIEC	5
Glossaire	5
Données et méthodologies	9
Sources et données	10
Principales sources	10
Données utilisées	10
Méthodologies	16
Sélection des scénarios : les C1	16
Filtrage complémentaire : incorporation de la faisabilité	20
Obtention de l'équation	29
Conclusions sur le cadre et l'approche méthodologique	31
Résultats	33
Scénario médian	33
Écarts avec et sans filtrage sur les C1	35
Élargissement aux scénarios C2, C3 et C4	35
Conclusions	37
Limites et autres remarques	37
Limites	37
Autres remarques	44
Conclusion	48
Ouverture : la nouvelle slide du Donut	49
Bonus - les IMPs	51
Définitions	51
Premiers résultats sans faisabilité en 2050 sur les IMPs	55
À l'échelle mondiale	55
À l'échelle individuelle	58
Analyses de la faisabilité des IMPs (C1)	59
Compléments sur l'analyse des IMPs	60
Bibliographie	62
Remerciements	67

Introduction

Contexte

Les 2 tonnes, une notion émergente depuis quelques années

2 tCO₂e par personne et par an en moyenne, c'est l'objectif structurant sur lequel se base l'atelier "2tonnes" depuis sa création. 2 tonnes, c'est une métrique lisible pour toute personne commençant à s'intéresser au sujet climatique. C'est un cap qui, paraît-il, permet de respecter les engagements internationaux de l'Accord de Paris. Mais d'où vient cet objectif ?

Démocratisées en France par quelques figures-clés de la lutte contre le réchauffement climatique, les 2 tonnes sont aujourd'hui largement connues et souvent présentées comme une cible à atteindre pour respecter nos engagements climatiques. Même si ce chiffre occulte un ensemble d'approximations et d'hypothèses, comme le présente BonPote dans son article *Objectif 2 tonnes : vrai défi ou mauvaise cible ?* (voir [1]), sa force pédagogique est indéniable et permet d'embarquer facilement de plus en plus d'acteurs dans des transformations structurantes.

Cette ambiguïté nous a poussé à re-questionner l'origine et la cohérence de l'objectif de 2 tCO₂e/an/pers. **D'où provient cet objectif ? Quelles sont ses principales limites ? Dans quelle mesure reflète-t-il une vision réaliste ? Est-il toujours pertinent à la lumière des nouvelles données du GIEC ? Enfin et surtout, que signifie-t-il et quelle est sa pertinence pour engager la société dans la transition écologique ?** Ce sont ces questions qui ont motivé notre étude et qui nous ont poussés à creuser en détail ses origines et ses implications. Mais avant d'établir une démarche, regardons d'où nous partons !

Une première étude réalisée en 2021 par 2tonnes

Rédigée courant 2021 par François Laugier (créateur et cofondateur de l'atelier 2tonnes), notre dernière étude *Objectif 2tonnes pour le climat : son origine, sa signification* (voir [2]), reprend de manière très large les origines des objectifs climatiques. Elle se base sur le *Global Warming of 1.5°C* (ou *SR1.5*, voir [3]) pour quantifier les niveaux d'émissions à suivre tout au long du XXI^e siècle. L'obtention du chiffre des "2 tonnes" est le fruit d'un travail sur les deux principaux scénarios moyens aboutissant à un réchauffement de +1,5°C à la fin du siècle. Le premier, sans dépassement, passe par une moyenne mondiale à 1,73 tCO₂e/pers. en 2050, et le second, avec dépassement, à 2,38 tCO₂e/pers. En moyennant ces deux valeurs, nous

aboutissons à un objectif simple, lisible et marquant : **2 tCO₂e/pers./an en moyenne en 2050**. Par la suite, cet objectif a constitué un des éléments structurants de l'atelier, fixant un cap permettant aux participants et participantes de se projeter dans les différentes transformations à mener.

3 ans après cette première publication, les émissions mondiales ne suivent toujours pas une trajectoire répondant à l'objectif. Par ailleurs, les connaissances scientifiques se sont complexifiées et précisées. L'objectif de 2 tonnes est-il toujours d'actualité ? Notre première étude sur le SR1.5 méritait d'être suivie par un tome 2 pour répondre à cette question.

Démarche

La présente étude se focalise sur l'évaluation critique d'un élément central dans le discours relatif à la crise climatique : l'objectif de réduction moyen, par personne, à l'échelle mondiale et en 2050 des émissions de gaz à effet de serre. Nous observons une certaine ambiguïté et un débat en cours concernant cet objectif, ce qui, selon nous, constitue une opportunité de faire avancer la discussion et de placer le sujet au cœur des réflexions.

Premièrement, nous estimons primordial de clarifier cet objectif pour deux raisons principales. Une formulation précise et pédagogique est indispensable pour orienter efficacement les actions entreprises dans ce domaine. De plus, des chiffres clairs, tels que le 10 tCO₂e/pers./an versus 2 tCO₂e/pers./an, ont démontré leur capacité à marquer les esprits et à susciter une prise de conscience collective. Ainsi, remettre en question la validité de cet objectif pourrait compromettre la crédibilité des connaissances associées et des acteurs qui les véhiculent, ce qui pourrait avoir des répercussions néfastes.

Deuxièmement, cette question nous concerne directement en tant que promoteurs de l'information sur le sujet. Il est donc essentiel, du point de vue éthique et pour notre impact, de garantir la qualité et la véracité de notre travail. En d'autres termes, le débat en cours nous amène à nous interroger sur la fiabilité de notre discours et sur la nature de notre influence. Si nous diffusons des informations erronées ou inatteignables, nous risquons de miner l'espoir et l'engagement du public envers des actions efficaces de lutte contre le changement climatique. C'est pourquoi il est important d'avoir de la clarté sur le sujet et de la diffuser largement.

Cela étant, comment avons-nous travaillé ? Pour mieux comprendre cet objectif et son importance, nous avons examiné les travaux antérieurs menés par différents acteurs de l'écosystème. Face au manque de consensus et à l'incertitude persistante, nous avons entrepris une démarche méthodique et rigoureuse. En utilisant des données fiables et une méthodologie appropriée, notre objectif est

triple : **mettre à jour** et **préciser** la cible “2 tCO₂e/pers/an” grâce aux nouvelles connaissances scientifiques parues par le GIEC depuis le SR1.5 et **intégrer** une quantification du potentiel de mise en oeuvre des scénarios.

Afin de répondre à ces objectifs, nous avons adopté une méthodologie consistant à calculer une empreinte carbone individuelle cible pour 2050 sur une sélection de scénarios du GIEC, de sorte que ces scénarios répondent à la fois aux objectifs de limitation du réchauffement climatique et à la fois à des enjeux de faisabilité quant à la mise en œuvre des solutions d’atténuation.

Avant de commencer

Référence aux travaux du GIEC

Lorsque nous citons un extrait des rapports d’évaluation du GIEC, nous indiquons une référence contenant :

- Le type de contenu (ex : une figure, un tableau).
- Le chapitre et le rapport.
- La page.

Par exemple, “[**Tableau 3.1, Chapitre 3 AR6 WGIII, 307**]” fait référence au tableau 3.1 situé page 307 du rapport du troisième groupe de travail du sixième rapport d’évaluation du GIEC.

Par ailleurs, nous citons des extraits des rapports des groupes de travail de l’AR6 en les traduisant, mais cette traduction de l’anglais au français n’est pas officielle. Le lecteur ou la lectrice peut retrouver le texte d’origine grâce à la référence indiquée (voir [26] à [30]).

Glossaire

IIASA = *International Institute for Applied Systems Analysis*, institut de recherche international qui fait progresser l’analyse des systèmes et applique ses méthodes de recherche pour identifier des solutions politiques permettant de réduire l’empreinte humaine, d’améliorer la résilience des systèmes naturels et socio-économiques et d’aider à atteindre les objectifs de développement durable.

ONU = *Organisation des Nations Unies*, vise principalement à maintenir la paix mondiale en promouvant les droits de l’homme, l’aide humanitaire, le développement durable et le respect du droit international.

Accord de Paris = traité international juridiquement non contraignant adopté lors de la COP21 (Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques) en 2015. Cet accord vise à limiter le réchauffement climatique en maintenant la hausse de la température mondiale bien en dessous de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels, tout en poursuivant les efforts pour limiter la hausse à 1,5 degré Celsius. Il repose sur les engagements volontaires des pays à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à renforcer leur résilience aux impacts du changement climatique.

GIEC = aussi *IPCC* en anglais, ce sigle signifie “*Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat*”. Le GIEC a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l’état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade.

SR1.5 = rapport spécial du GIEC sur les effets d’un réchauffement planétaire de +1.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et sur les trajectoires des émissions mondiales de gaz à effet de serre, paru en 2018 (entre l’AR5 et l’AR6).

AR6 WGI = *Assessment Report 6, Working Group I*, rapport du groupe de travail numéro 1 du 6e rapport du GIEC paru en 2023. Ce groupe évalue les aspects scientifiques du système climatique et de l’évolution du climat.

AR6 WGII = *Assessment Report 6, Working Group II*, rapport du groupe de travail numéro 2 du 6e rapport du GIEC paru en 2023. Ce groupe travaille sur les impacts, la vulnérabilité et l’adaptation au changement climatique.

AR6 WGIII = *Assessment Report 6, Working Group III*, rapport du groupe de travail numéro 3 du 6e rapport du GIEC paru en 2023. Ce groupe travaille sur l’atténuation du changement climatique.

SPM = *Summary for Policymakers*, résumé concis des résultats de chaque groupe de travail à l’intention des décideurs. Ce rapport fournit un résumé de haut niveau des principales conclusions du rapport du groupe de travail et est approuvé par les gouvernements membres du GIEC, ligne par ligne.

TS = *Technical Summary*, résumé technique des résultats de chaque groupe de travail. Ce rapport fournit un résumé détaillé des principales conclusions et sert de lien entre l’évaluation globale du rapport du groupe de travail et le SPM associé.

GES = *Gaz à Effet de Serre*, gaz atmosphériques qui retiennent une partie de la chaleur émise par la Terre vers l’atmosphère, contribuant ainsi à l’effet de serre. L’augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l’atmosphère se traduit par une hausse de sa température.

Puits de carbone = systèmes naturels ou artificiels absorbant et stockant le carbone de l'atmosphère, tels que les forêts et les océans.

CDR = *Carbon Dioxide Removal*, méthodes d'élimination directe du carbone via des approches naturelles, technologiques ou hybrides.

CCS = *Carbon Capture and Storage*, Capture et stockage du CO₂ émis par les industries pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

BECCS = *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*, production d'énergie à partir de biomasse avec capture et stockage du carbone pour réduire les émissions nettes de CO₂.

DAC = *Direct Air Capture*, extraction directe du CO₂ de l'air, souvent à l'aide de filtres chimiques ou technologies, pour le stocker de manière permanente sous terre ou d'autres utilisations.

Météorisation augmentée = processus accéléré de décomposition des roches à la surface de la Terre, favorisé par divers facteurs environnementaux, contribuant à la séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique dans les sols.

Reboisement = le reboisement consiste à planter des arbres dans des zones déboisées pour capturer le dioxyde de carbone atmosphérique lors de la photosynthèse, agissant ainsi comme des puits de carbone.

Biochar = le biochar est un produit de la pyrolyse de matières organiques. Il est utilisé pour améliorer la fertilité du sol tout en séquestrant le carbone à long terme, contribuant ainsi à la captation du carbone.

+1.5°C (>50%) = scénario limitant le réchauffement global à +1,5°C relativement à 1850-1900 et ce avec une probabilité supérieure à 50%. De la même façon, nous pouvons définir les scénarios « +2°C (>67%) » ou autres.

C1 - C4 = ensemble de scénarios limitant le réchauffement à maximum +2°C à la fin du siècle (les C1, C2, C3 et C4). Ils représentent un total de 687 scénarios.

SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*. Il s'agit de cinq trajectoires narratives développées par la communauté scientifique pour explorer différentes voies de développement socio-économique et leurs implications sur le climat et l'environnement.

IMPs = *Illustrative Mitigation Pathways*. Scénarios mis en avant dans le dernier rapport du GIEC. Ils explorent différentes manières d'atteindre les objectifs de température à long terme. Les IMPs comprennent un ensemble de voies de transformation qui illustrent comment les choix peuvent conduire à des

transformations distinctes susceptibles de contenir l'augmentation de la température en deçà de 2°C (>67%) ou de 1,5°C.

Fit for 55 = ensemble de propositions législatives de l'Union européenne visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990.

SNBC = *Stratégie nationale bas-carbone*. Il s'agit d'un plan élaboré par certains pays pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et s'engager dans la transition vers une économie à faible émission de carbone.

SDES = *Système de Données sur l'Environnement et le Développement Durable*, dispositif français mis en place pour collecter, gérer et diffuser des données sur l'environnement et le développement durable afin d'appuyer la prise de décision et l'élaboration de politiques.

Données et méthodologies

Nous présentons ici une synthèse des défis rencontrés et des solutions méthodologiques adoptées pour notre travail.

Tout d'abord, la base de données sélectionnée est la plus rigoureuse sur ces sujets. Celle-ci est hébergée par l'IIASA et contient l'intégralité des scénarios de transition du WGIII. Cette base de données est très complète et comporte une grande diversité de scénarios, qui ne sont pas tous pertinents pour notre étude. En effet, nous nous intéressons seulement aux scénarios de transition qui permettent de respecter l'Accord de Paris. Dans ce contexte, définir un cap d'émissions en 2050 en intégrant des scénarios à +3°C, ou pire, serait absurde. Ainsi, nous avons sélectionné un sous ensemble respectant au moins l'accord international. Plus encore, nous avons imposé des conditions exigeantes aux scénarios en ne gardant que ceux respectant l'Accord de Paris : les scénarios contraignant le réchauffement à **+1.5°C (>50%) sans dépassement**.

Ensuite, les chercheurs explorent les futurs possibles au travers des scénarios. Ils représentent des réalités variées dont les hypothèses qui les sous-tendent peuvent être très ambitieuses. Puisque nous sommes en mesure de quantifier la faisabilité de ces scénarios, nous nous sommes imposés de ne sélectionner que ceux avec un degré de **faisabilité plausible**.

Enfin, les données IIASA comportent de multiples variables pour caractériser les scénarios : émissions nettes de CO₂, émissions nettes de tous gaz à effet de serre confondus, émissions négatives par source d'absorption, etc. Nous trouvons presque 1 800 variables dans la base de données ! Mais nous ne disposons pas des émissions brutes de gaz à effet de serre. Or, c'est ce que nous cherchons. L'objectif des deux tonnes, ce sont des **émissions brutes** par habitant, car l'atelier se concentre sur la réduction des émissions par les sociétés humaines hors absorption. Nous avons donc dû reconstituer cette variable à partir de celles de la base de données. Pour cela, nous avons construit une **équation** en estimant les émissions brutes à partir de la somme des émissions nettes et de l'absorption, comptée positivement.

En somme, trois étapes méthodologiques :

- La présélection des scénarios à **+1.5°C (>50%) sans dépassement**.
- **L'étude du potentiel de mise en œuvre** des scénarios et l'application de filtres en ce sens pour s'assurer que les scénarios finaux proposent des transformations réalistes.
- La définition d'une équation pour **estimer les émissions brutes** moyennes par personne en 2050, à partir des données disponibles et d'un ensemble prédéfini de scénarios.

Le tout permettant d'aboutir à un ensemble de scénarios et d'interprétations, présentés dans la partie Résultat.

Sources et données

Principales sources

Les données utilisées proviennent de trois sources :

- Les données relatives aux scénarios sont issues de la base de données de l'International Institute for Applied Systems Analysis (aussi IIASA, voir [4]), hébergeant l'AR6. Cette base de données contient plusieurs milliers de scénarios. Un processus de vérification de tous les scénarios soumis a été entrepris dans l'AR6 pour repérer les scénarios dont les données sur les émissions et l'énergie se situaient dans des fourchettes historiques raisonnables (voir [5]).
- L'estimation de la population mondiale sur tout le XXIe siècle est issue des projections de l'Organisation des Nations Unies (aussi ONU, voir [6]). Il est aussi envisageable d'exploiter les projections des SSP, particulièrement SSP2 et SSP1, comme évoqué dans la section « *Limites et autres remarques* ».
- Les données de faisabilité d'une grande majorité des scénarios nous ont été fournies par E. Brutschin. Ces données quantifient la faisabilité de chacun des scénarios selon plusieurs axes. Les résultats de Brutschin et al. (2021) sont utilisés dans le troisième groupe de travail du dernier rapport du GIEC.

Données utilisées

Données IIASA

L'IIASA renferme une quantité significative d'informations concernant les travaux prospectifs du WGIII, et constitue la **principale source de données** pour notre étude. Certaines ont servi aux calculs finaux, d'autres ont simplement permis de détailler les hypothèses sous-jacentes et de réaliser des calculs intermédiaires.

Le premier sous-ensemble de données récupéré correspond à la **classe de réchauffement** des scénarios, soit :

Variable	Contenu (documentation IIASA traduite)	Utilité
Category_name	Résultats de l'évaluation climatique. Voir le chapitre 3 et l'annexe C pour plus de détails.	Filtrage par valeur de réchauffement au long du XXIe siècle.

Cette classification est effectuée à partir d'un émulateur (voir [7]), c'est-à-dire un petit modèle climatique permettant de réaliser des projections climatiques (concentration de GES, montée des eaux, élévation de la température, etc.). Cet élément nous fournit directement le niveau de réchauffement atteint par chacun d'entre eux (de +1,5°C à >+4°C). Cela nous permet de disposer d'un premier critère pour écarter une partie des scénarios, en fonction d'une valeur seuil de réchauffement autorisée que nous définirons par la suite. La démarche est détaillée dans la section « *Périmètre : quel cadre pour l'étude* ».

Le second sous-ensemble exporté est celui des **émissions nettes** de gaz à effet de serre. Pour cela, nous récupérons deux variables utiles :

Variable	Contenu (documentation IIASA traduite)	Utilité
AR6 climate diagnostics Infilled Emissions Kyoto Gases (AR6-GWP100)	Émissions annuelles nettes du scénario, harmonisées par rapport aux émissions historiques (cohérence avec les modèles climat IPCC AR6 WG1) et complétées par des émissions non considérées par le modèle générateur du scénario.	Calcul des émissions brutes.
AR6 climate diagnostics Infilled Emissions CO2	<i>Documentation vide.</i> Correspond aux émissions de CO ₂ complétées selon les mêmes méthodes que la variable précédente.	Affichage des courbes d'émissions de CO ₂ .

Les données IIASA ne concernent que des émissions nettes, mais notre méthodologie exige des données sur les émissions brutes. Pour inférer les émissions brutes à partir des données disponibles, nous construisons une équation détaillée dans la section « Obtention de l'équation ».

Ce calcul nécessite les valeurs d'absorption anthropiques, aussi appelées Carbon Dioxide Removal (CDR), qui sont comptées positivement et à l'échelle mondiale. Nous établissons une équation entre nos trois variables :

$$\text{Emissions nettes} = \text{Emissions brutes} - \text{Absorption anthropique}$$

Pour ce faire, nous récupérons toutes les données quantifiant l'**absorption** par nos sociétés, toutes technologies confondues. Les méthodes de capture sont regroupées en famille, identifiées ci-dessous par des couleurs identiques. Les variables décrivant des catégories entières sont présentées en gras. Nous récupérons alors :

Variable	Contenu (documentation IIASA traduite)	Utilité
Carbon Sequestration CCS	Élimination anthropique du CO ₂ par des méthodes de capture et de stockage.	Quantification de la CDR.
Carbon Sequestration CCS Bio mass	(BECCS) Élimination anthropique du CO ₂ par capture lors de l'utilisation des bioénergies avec stockage dans des gisements géologiques et dans les grands fonds marins. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration CCS".</i>	
Carbon Sequestration CCS Fossil	Élimination anthropique du CO ₂ par capture lors de la combustion de ressources fossiles avec stockage dans des gisements géologiques et dans les grands fonds marins. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration CCS".</i>	
Carbon Sequestration CCS Industrial Processes	Élimination anthropique du CO ₂ par capture lors de processus industriels avec stockage dans des gisements géologiques et dans les grands fonds marins. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration CCS".</i>	
Carbon Sequestration Direct Air Capture	(DAC) Élimination anthropique du CO ₂ via capture directe dans l'air.	Quantification de la CDR.
Carbon Sequestration Enhanced Weathering	Élimination anthropique du CO ₂ via météorisation augmentée.	Quantification de la CDR.
Carbon Sequestration Land Use	Élimination anthropique du CO ₂ à travers des puits de carbone terrestres.	Quantification de la CDR.
Carbon Sequestration Land Use Afforestation	Élimination anthropique du CO ₂ par reboisement. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration Land Use".</i>	
Carbon Sequestration Land Use Biochar	Élimination anthropique du CO ₂ par biochar. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration Land Use".</i>	

Carbon Sequestration Land Use Other	Élimination anthropique du CO ₂ par d'autres méthodes d'atténuation utilisant la terre. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration Land Use".</i>	
Carbon Sequestration Land Use Soil Carbon Management	Élimination anthropique du CO ₂ par techniques de gestion du carbone dans les sols. <i>Sous variable de "Carbon Sequestration Land Use".</i>	
Carbon Sequestration Feedstocks	Élimination anthropique du CO ₂ via des matières premières (lubrifiants, asphalte, plastiques, etc.).	Quantification de la CDR.
Carbon Sequestration Other	Élimination anthropique du CO ₂ avec d'autres méthodes.	Quantification de la CDR.

En somme, cette base de données offre un niveau de granularité très fin : les variables sont décomposées en un ensemble de sous-variables et selon plusieurs niveaux de précision. Avec toutes ces variables, nous sommes en mesure de :

- **Faire l'examen de l'ensemble des scénarios que nous conservons**, à partir des classes de réchauffement.
- **Estimer les émissions brutes mondiales** à n'importe quel moment.

En définitive, seulement 1 paramètre et 8 variables de l'IIASA sont utilisées :

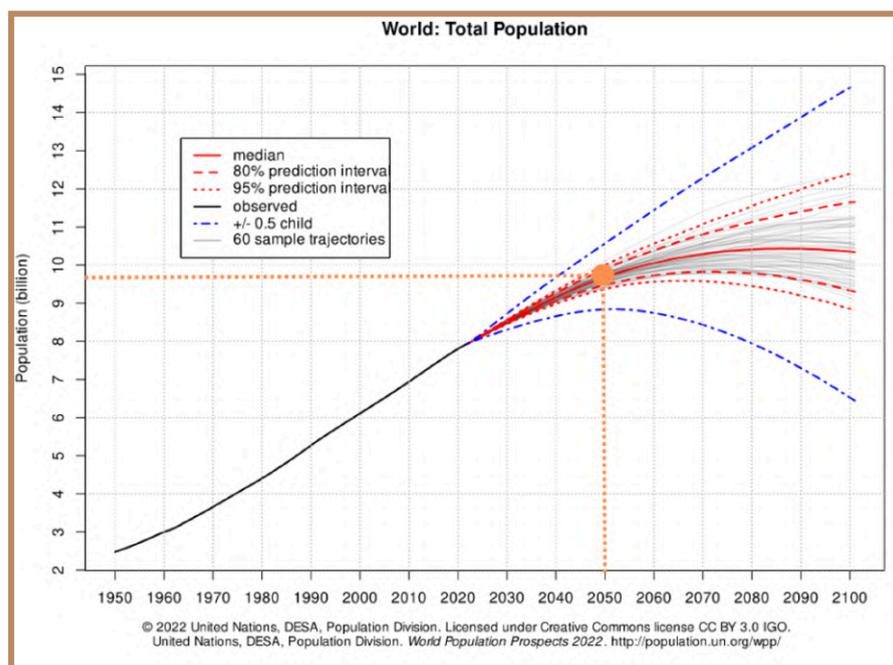
- La valeur de réchauffement au long du XXI^e siècle (1 paramètre), pour le filtrage des scénarios en fonction de leur classe de réchauffement.
- Les émissions nettes au long du XXI^e siècle, par scénario (1 variable), pour le calcul des émissions brutes.
- Les valeurs d'absorption par méthode anthropique (6 variables), pour le calcul des émissions brutes.

À ces données, nous ajoutons la projection de population de l'ONU pour établir le résultat en moyenne par personne à l'échelle mondiale.

Données ONU

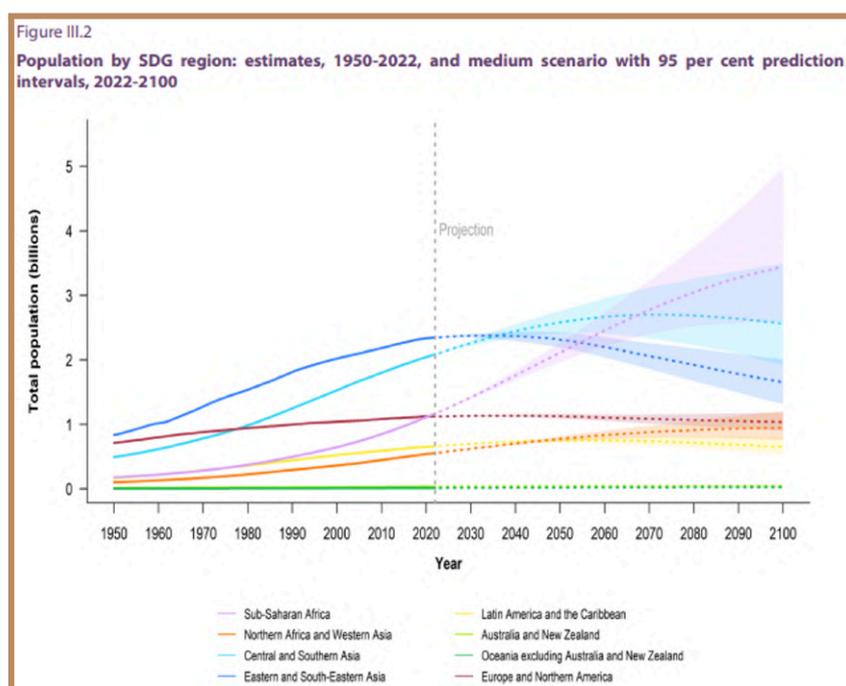
Après téléchargement des données de l'ONU, nous récupérons le contenu de la variable "*Total Population, as of 1 January (thousands)*" sur la période 2020 - 2100, pour le périmètre monde. Cette variable correspond à la médiane de la population estimée au 1^{er} janvier de chaque année.

Voici les résultats des projections de l'ONU jusqu'en 2100, avec le point de passage en 2050 indiqué en orange :



Pour 2050, l'ONU projette donc **9 687 440 000 personnes** sur Terre.

Notons que ce résultat est la somme de projections, pays par pays, sur le taux de fécondité, le taux de mortalité et les migrations nettes internationales. Ainsi, les populations par année sont également disponibles par pays, ou par région géographique (voir [8]) :



Avec, de manière simplifiée, l'estimation de la population à n'importe quel instant $t + n$ (t = instant initial, n = intervalle de temps) et pour chaque zone géographique à partir de :

$$Population(t + n) = Population(t) + Births(t \rightarrow t + n) - Deaths(t \rightarrow t + n) + Net\ migrations(t \rightarrow t + n)$$

Avec :

$$\begin{aligned} Births(t \rightarrow t + n) &= \text{nombre de naissances dans l'intervalle } n, \text{ partir de } t \\ Deaths(t \rightarrow t + n) &= \text{nombre de morts dans l'intervalle } n, \text{ partir de } t \\ Net\ migrations(t \rightarrow t + n) &= \text{migration internationale net dans l'intervalle } n, \text{ partir de } t \end{aligned}$$

Pour plus de détail, nous conseillons de parcourir la méthodologie de l'ONU accessible en ligne (voir [9]).

Ce résultat est donc le fruit d'études complètes et reste, à ce jour, **l'un des plus fiables** à notre disposition. Notre approche pour estimer la taille de la population présente certaines limites (voir « *Limites et autres remarques* »), mais constitue un socle suffisamment fiable pour la suite de notre travail. D'autres données de population peuvent être utilisées, notamment les projections du scénario intermédiaire des SSP, SSP2 (voir [10]). En pratique, les variations de ces projections ne modifient que marginalement le résultat prévu pour 2050 (à l'ordre 2), et n'affectent pas les conclusions de notre analyse.

Données de faisabilité

N. B. : Le concept de faisabilité est défini plus loin, dans la partie « Filtrage complémentaire : incorporation de la faisabilité ».

Afin d'étudier les scénarios à travers le prisme de leur potentiel de mise en œuvre, nous incorporons une analyse de faisabilité. Cette étude nécessite un ensemble précis de données pour quantifier les faisabilités. Dans notre cas, Elina Brutschin, chercheuse à l'IIASA et développeuse de ce concept intégré au sein du WGIII, nous a directement fourni les quantifications, nous épargnant une grande partie de la charge de travail nécessaire à son traitement. Parmi le large éventail de données mis à disposition par E. Brutschin, nous n'en utilisons qu'une infime partie. Ce sous-ensemble représente tout de même plus de 37 000 valeurs sur les 688 scénarios limitant le réchauffement à +2°C !

Maintenant les données présentées, nous pouvons présenter l'approche méthodologique.

Méthodologies

Sélection des scénarios : les C1

Pour établir un cap d'émissions en 2050, nous devons commencer par définir un cadre d'étude. Ce choix est important car il nous oblige à prendre une décision forte qui reflète un objectif international et un niveau d'ambition mondial. **Notre objectif est-il de +1,5°C ? +2°C ? Est-il situé entre ces deux températures ?** Nous définissons ce périmètre pas à pas dans la section qui suit.

Classes de réchauffement

Pour définir notre périmètre, nous partons des classes de réchauffement proposées dans l'AR6. Chaque scénario est associé à **un niveau de réchauffement et à une probabilité à la fin du siècle**, ce qui permet de les distinguer en 8 classes différentes, de C1 à C8. Par exemple, tous les scénarios de type C1 entraînent un réchauffement de +1,5°C avec une probabilité supérieure à 50%, sans ou avec faible dépassement. Cette classification offre plusieurs avantages : elle permet notamment d'identifier des caractéristiques communes avec d'autres ensembles de scénarios utilisés par le WGI et le WGII (IMP, SSP), de faciliter les comparaisons entre ces ensembles et de fournir un cadre clair pour la communication des résultats sur ces modèles. Le tableau 3.1 du troisième groupe de travail de l'AR6 ([**Tableau 3.1, Chapitre 3 AR6 WGIII, 307**]) en apporte une description exhaustive :

Table 3.1 | Classification of emissions scenarios into warming levels using MAGICC

Category	Description	WGI SSP	WGIII IP/IMP	Scenarios
C1: Limit warming to 1.5°C (>50%) with no or limited overshoot	Reach or exceed 1.5°C during the 21st century with a likelihood of ≤67%, and limit warming to 1.5°C in 2100 with a likelihood >50%. Limited overshoot refers to exceeding 1.5°C by up to about 0.1°C and for up to several decades.	SSP1-1.9	IMP-SP, IMP-LD, IMP-Ren	97
C2: Return warming to 1.5°C (>50%) after a high overshoot	Exceed warming of 1.5°C during the 21st century with a likelihood of >67%, and limit warming to 1.5°C in 2100 with a likelihood of >50%. High overshoot refers to temporarily exceeding 1.5°C global warming by 0.1°C–0.3°C for up to several decades.		IMP-Neg ^a	133
C3: Limit warming to 2°C (>67%)	Limit peak warming to 2°C throughout the 21st century with a likelihood of >67%.	SSP1-2.6	IMP-GS	311
C4: Limit warming to 2°C (>50%)	Limit peak warming to 2°C throughout the 21st century with a likelihood of >50%.			159
C5: Limit warming to 2.5°C (>50%)	Limit peak warming to 2.5°C throughout the 21st century with a likelihood of >50%.			212
C6: Limit warming to 3°C (>50%)	Limit peak warming to 3°C throughout the 21st century with a likelihood of >50%.	SSP2-4.5	ModAct	97
C7: Limit warming to 4°C (>50%)	Limit peak warming to 4°C throughout the 21st century with a likelihood of >50%.	SSP3-7.0	CurPol	164
C8: Exceed warming of 4°C (≥50%)	Exceed warming of 4°C during the 21st century with a likelihood of ≥50%.	SSP5-8.5		29
C1, C2, C3: limit warming to 2°C (>67%) or lower	All scenarios in Categories C1, C2 and C3			541

^a The Illustrative Mitigation Pathway 'Neg' has extensive use of carbon dioxide removal (CDR) in the AFOLU, energy and the industry sectors to achieve net negative emissions. Warming peaks around 2060 and declines to below 1.5°C (50% likelihood) shortly after 2100. Whilst technically classified as C3, it strongly exhibits the characteristics of C2 high-overshoot pathways, hence it has been placed in the C2 category. See Box SPM.1 for an introduction of the IPs and IMPs.

Cette classification nous fournit un premier paramètre sur lequel discriminer certains scénarios. Cependant, pour établir cette distinction, il est nécessaire de

définir un seuil de réchauffement. À cet égard, nous nous appuyons en toute logique sur les accords internationaux, tels que **l'Accord de Paris**.

Accord de Paris

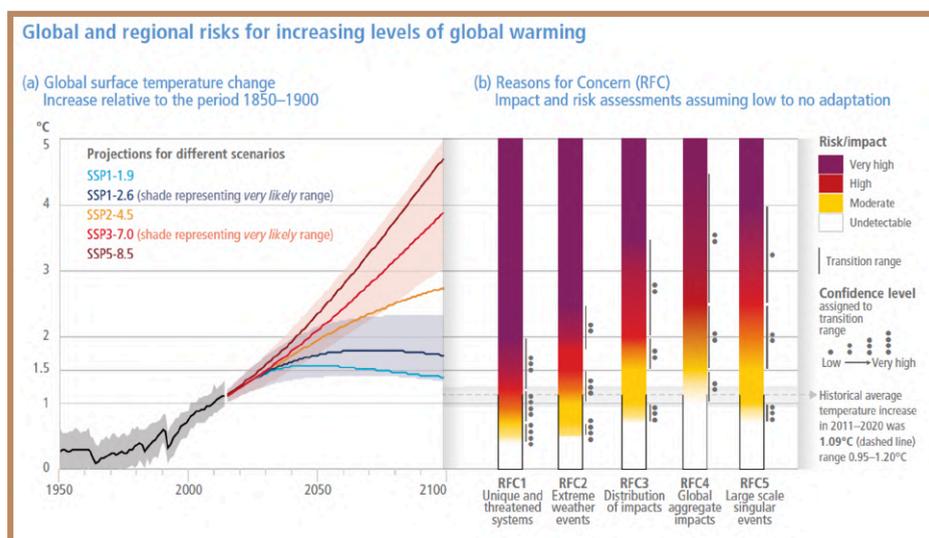
L'Accord de Paris (voir [11]) est un traité international juridiquement contraignant sur les changements climatiques, adopté par 196 parties lors de la COP 21 en 2015 à Paris. Son objectif primordial est de :

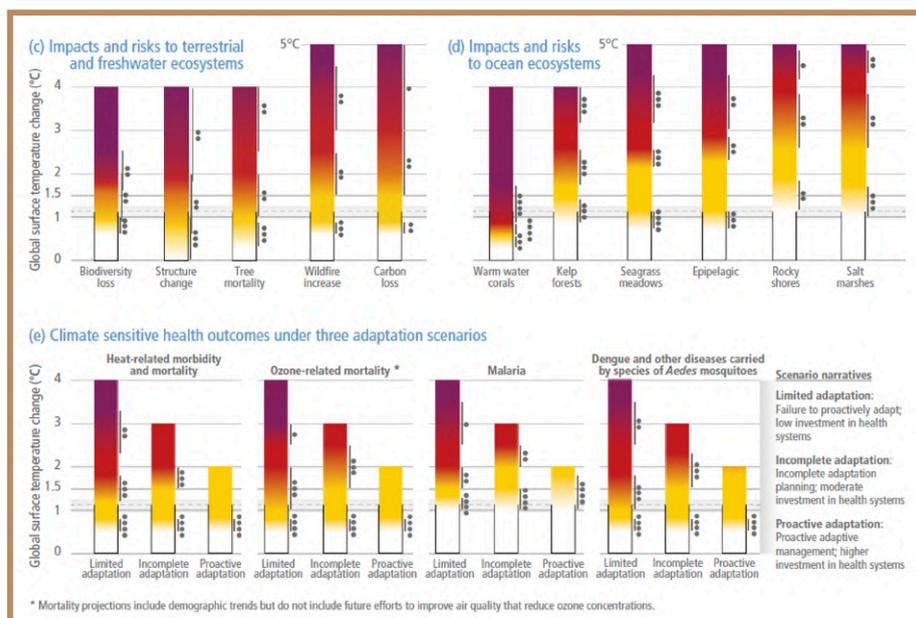
Maintenir « l'augmentation de la température moyenne mondiale **bien en dessous de 2°C** au-dessus des niveaux préindustriels » et de poursuivre les efforts « pour **limiter l'augmentation de la température à 1,5°C** au-dessus des niveaux préindustriels. »

"L'Accord de Paris", CCNUCC

L'interprétation de cet objectif nous conduit naturellement à définir un premier périmètre sur les classes de scénarios considérées (pour l'interprétation, voir aussi [12] ou [13]). En effet, maintenir l'augmentation des températures moyennes mondiales « *bien en dessous de 2°C* » signifie que les trajectoires d'émissions doivent maintenir les niveaux de réchauffement bien inférieurs à cette limite tout au long du XXI^e siècle, voire indéfiniment. Appliquée aux classes des scénarios, cette contrainte nous conduit à exclure les scénarios C3 et C4, qui ne permettent pas de limiter le réchauffement à un niveau bien en dessous de +2°C. Nous ne conservons donc que **les scénarios C1 et C2**.

Ce choix peut aussi être appuyé par la différence d'impacts en fonction de l'élévation de la température, comme en témoignent les graphiques "*Global and regional risks for increasing levels of global warming*" du WGII (**[TS AR6 WGII, 58]**) qui présentent le risque/impact d'un ensemble de facteurs en fonction du réchauffement :





Par ailleurs, le choix de contenir notre étude aux scénarios C1 et C2, c'est-à-dire ceux qui limitent le réchauffement à +1,5 °C (> 50 %) avec ou sans dépassement, est aligné avec notre précédente étude sur le SR1.5 (voir [2]). Cependant, une distinction majeure persiste au sein des scénarios conservés : la présence ou non d'un **dépassement fort** au cours du XXI^e siècle.

Dépassement

Le dépassement est un critère clé qui différencie largement les scénarios. En se référant au tableau 3.1 du chapitre 3 de l'AR6, un dépassement fort se traduit par une augmentation temporaire de la température au-delà de +1,5°C, d'une amplitude allant de +0,1°C à +0,3°C, et ce, pendant plusieurs décennies. Il convient de ne pas confondre cette notion avec un dépassement limité, qui équivaut à une hausse maximale de +0,1°C au-delà de +1,5°C pendant plusieurs décennies. En termes de conséquences, et en reprenant la section "*Temporary overshoot*" ([TS AR6 WGII, 69]) :

- Les voies de réchauffement qui impliquent une augmentation temporaire de la température supérieure à "bien en dessous de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle" sur des périodes de plusieurs décennies impliquent des risques graves et des impacts irréversibles sur de nombreux systèmes naturels et humains (par exemple, fonte des glaciers, perte de récifs coralliens, perte de vies humaines en raison de la chaleur), même si les objectifs de température sont atteints plus tard (*confiance élevée*).
- Le dépassement augmente considérablement le risque que le carbone stocké dans la biosphère soit libéré dans l'atmosphère en raison de l'augmentation de processus tels que les incendies de forêt, la mortalité des arbres, les

invasions d'insectes nuisibles, l'assèchement des tourbières et le dégel du pergélisol (*confiance élevée*).

- L'extinction des espèces est un effet irréversible du changement climatique dont le risque augmente fortement avec l'augmentation de la température mondiale (*confiance élevée*).

Ces informations nous amènent à contraindre encore l'ensemble des scénarios considérés en excluant les dépassements, au regard des conséquences précédemment mises en exergue. Dès lors, nous nous arrêtons aux scénarios C1, c'est-à-dire ceux qui **limitent le réchauffement à +1,5 °C (> 50 %) sans ou avec faible dépassement** (ce qui est accordé avec d'autres analyses, voir [14]).

Cadre final

En couplant cet objectif de réchauffement à un horizon temporel fixé à 2050, nous le concilions avec l'échelle de transformation des sociétés. En effet :

- Cette temporalité est pertinente pour aborder les **transformations nécessaires**, en tenant compte des délais requis (évolution des normes, développement des infrastructures, modification des normes économiques, etc.).
- La majorité de l'atténuation du changement climatique par la réduction des émissions hors absorption devra être réalisée d'ici 2050.
- C'est une **échéance de référence** présente dans de multiples objectifs nationaux, en particulier l'objectif de neutralité climatique (Fit for 55 de l'Union Européenne, Stratégie nationale bas-carbone de la France, etc.).

En considérant en plus notre travail de faisabilité (défini dans « *Filtrage complémentaire : incorporation de la faisabilité* ») et 2050 comme échéance temporelle, nous établissons que le périmètre final de notre étude **doit** être :

L'estimation des émissions brutes **moyennes** par personne au niveau mondial en **2050** pour un réchauffement de **+1,5°C (>50%) à la fin du siècle sans ou avec faible dépassement** et avec prise en compte de la faisabilité des solutions d'atténuation.

Ce cadre, déjà justifié par les points précédents, est aligné avec la vision de 2tonnes sur la transition :

- Il traduit la volonté que nous mettons dans une transition ambitieuse.
- Il défend l'émergence d'un monde durable pour le plus grand nombre.
- Il est accordé avec les engagements climatiques mondiaux et une large littérature scientifique qui assoient les C1 comme objectif.

Nous couvrons donc un total de **97 scénarios C1** pour établir notre résultat en 2050. Dans un second temps, l'étude sera élargie aux C2 (132 scénarios), C3 (307 scénarios) et C4 (152 scénarios) pour appréhender ce que contiennent les différentes classes et les implications qu'ont de tels scénarios.

Filtrage complémentaire : incorporation de la faisabilité

Nous avons été soucieux du réalisme des scénarios que nous avons examinés, afin d'éviter des résultats qui seraient peu en phase avec la réalité. Cette préoccupation est centrale dans le domaine de la prospective, qui doit naviguer entre les contraintes de l'exercice et les incertitudes auxquelles elle cherche à répondre. Dans le contexte de cette incertitude, les scientifiques développent des scénarios pour envisager différentes trajectoires futures. De la même manière, lorsque nous cherchons à susciter des changements, l'élaboration de scénarios nous aide à visualiser les moyens d'y parvenir. Cependant, il est souvent difficile de déterminer ce qui est réaliste, conservateur, etc. Pour aborder cette difficulté, nous avons décidé d'ajouter une approche supplémentaire à notre étude, axée sur la "**faisabilité**", afin d'étudier le potentiel de mise en œuvre des transformations proposées par ces scénarios. Cette approche a été appliquée à tous les scénarios de type C1, et elle a été étendue aux scénarios C2, C3 et C4 en complément.

Introduction à la faisabilité

La faisabilité est d'abord définie dans le rapport du GIEC comme suit :

La faisabilité fait référence au potentiel de mise en œuvre d'une option d'atténuation ou d'adaptation. Les facteurs influençant la faisabilité dépendent du contexte, sont dynamiques dans le temps et peuvent varier selon les groupes et les acteurs. La faisabilité dépend de facteurs géophysiques, environnementaux-écologiques, technologiques, économiques, socioculturels et institutionnels qui permettent ou limitent la mise en œuvre d'une option. La faisabilité des options peut changer lorsque différentes options sont combinées, et augmenter lorsque les conditions favorables sont renforcées.

Annex I, AR6 WGIII, 1802

Cette approche nous permet de quantifier le potentiel de mise en œuvre de solutions d'atténuation de nos différents scénarios. Pour cela, l'analyse des scénarios d'atténuation a été enrichie par l'étude du cadre de faisabilité multidimensionnel élaboré par Brutschin et al. (2021, voir [15]), qui prend en compte cinq dimensions : géophysique, économique, technologique, socio-culturelle et institutionnelle. Pour chaque dimension, un ensemble d'indicateurs a été développé, permettant de comprendre non seulement l'échelle, mais aussi la temporalité et le caractère perturbateur des changements structurels.

Démarche concrète : évaluer la faisabilité

Les scénarios sont décrits selon 6 axes (même si l'axe "environmental-ecological" n'est pas l'objet de quantifications) définis dans le tableau 6.1 du chapitre "Energy Systems" du WGIII ([Table 6.1, Chapter 6 AR6 WGIII, 630]) :

Metric	Indicators
Geophysical: Are the required resources available?	<ul style="list-style-type: none"> Physical potential: physical constraints to implementation Geophysical resources (including geological storage capacity): availability of resources needed for implementation Land use: claims on land where an option would be implemented
Environmental-ecological: What are the wider environmental and ecological impacts of the option?	<ul style="list-style-type: none"> Air pollution: increase or decrease in air pollutants, such as NH₄, CH₄ and fine dust Toxic waste, ecotoxicity and eutrophication Water quantity and quality: changes in the amount of water available for other uses Biodiversity: changes in conserved primary forest or grassland that affect biodiversity, and management to conserve and maintain land carbon stocks
Technological: Can the required technology be upscaled soon?	<ul style="list-style-type: none"> Simplicity: is the option technically simple to operate, maintain and integrate? Technology scalability: can the option be scaled up technically? Maturity and technology readiness: research and development (R&D) and time needed to implement the option
Economic: What economic conditions can support or inhibit the implementation of the option?	<ul style="list-style-type: none"> Costs in 2030 and in the long term: investment costs, costs in USD tCO₂-eq⁻¹ Employment effects and economic growth: decrease or increase in jobs and economic welfare
Socio-cultural: What social conditions could support or inhibit acceptance, adoption, and use of the option before 2030?	<ul style="list-style-type: none"> Public acceptance: the extent to which the public supports the option and will change their behaviour accordingly Effects on health and well-being Distributional effects: equity and justice across groups, regions, and generations, including energy, water, and food security and poverty
Institutional: What institutional conditions could support or inhibit the implementation of the option?	<ul style="list-style-type: none"> Political acceptance: the extent to which politicians support the option Institutional capacity and governance, cross-sectoral coordination: capability of institutions to implement and handle the option Legal and administrative capacity

Chaque axe est décrit par un ensemble de sous-axes, qui sont **précis et quantifiables**. Par exemple, l'axe "géophysique" est décomposé en 3 sous-axes : potentiel de biomasse, potentiel éolien et potentiel solaire. À chaque sous-axe est associé un niveau de préoccupation, qui dépend d'une métrique adaptée, telle que le potentiel maximum annuel de génération d'énergie primaire en EJ/an. Il y a **trois niveaux de préoccupation**, chacun étant associé à une appréciation sur le potentiel de mise en œuvre et à un nombre entier, comme suit :

Niveau de préoccupation	Description	Valeur associée
High	<i>unprecedented</i> - taux de transformation sans précédent et spéculatif	3
Medium	<i>best-case scenario</i> - peut être extrapolé de manière plausible sur la base de l'état actuel des connaissances	2
Low	<i>plausible</i> - documenté dans la littérature	1

Ces niveaux de préoccupation sont déterminés pour chaque horizon temporel à partir de deux valeurs-seuils propres à chaque sous-axe. Par exemple, le sous-axe "réduction du PIB" est encadré par deux valeurs exprimées en réduction décennale

relative du PIB, tandis que le sous-axe "potentiel solaire" est encadré par deux valeurs en EJ/an de génération d'énergie primaire. Ainsi, si sur un intervalle de temps donné :

- Un scénario dépasse le premier seuil, il est catégorisé "Medium" sur ce critère et est donc quantifié par 2.
- S'il dépasse le second seuil, il est catégorisé "High" et quantifié par 3.
- S'il n'en dépasse aucun, il est catégorisé "Low" et quantifié par 1.

Ces deux valeurs seuil correspondent soit à des évolutions sur une durée fixée (généralement 10 ans), soit à une capacité maximale d'installation. Par exemple, les réductions des demandes d'énergie sectorielle, comme le transport ou l'industrie, sont encadrées par des pourcentages de réduction sur 10 ans. Le déploiement de BECCS est lui bordé par une capacité maximale annuelle d'absorption. Cette approche est résumée et accompagnée de quantifications dans le tableau 8 de l'annexe III du WGIII ([Tableau 8, Annex III AR6 WGIII, 1877]) :

	Indicators	Computation	Medium	High	Source	
Geophysical	Biomass potential	Total primary energy generation from biomass in a given year	100 EJ yr ⁻¹	245 EJ yr ⁻¹	Frank et al. (2021); Creutzig et al. (2014)	
	Wind potential	Total secondary energy generation from wind in a given year	830 EJ yr ⁻¹	2000 EJ yr ⁻¹	Deng et al. (2015); Eureka et al. (2017)	
	Solar potential	Total primary energy generation from solar in a given year	1600 EJ yr ⁻¹	50 000 EJ yr ⁻¹	Rogner et al. (2012); Moomaw et al. (2011)	
Economic	GDP loss	Decadal percentage difference in GDP in mitigation vs baseline scenario	5%	10%	Analogy to current COVID-19 spending Andrijevic et al. (2020c)	
	Carbon price	Carbon price levels (NPV) and decadal increases	USD60	USD120 and 5x	Brutschin et al. (2021); OECD (2021)	
	Energy Investments	Ratio between investments in mitigation vs baseline in a given decade	1.2	1.5	McCollum et al. (2018)	
	Stranded coal assets	Share of prematurely retired coal power generation in a given decade	20%	50%	Brutschin et al. (2021); Global Energy Monitor (2021)	
Technological	Established	Wind/solar scale-up	Decadal percentage point increase in the wind/solar share in electricity generation	10 pp	20 pp	Brutschin et al. (2021); Wilson et al. (2020)
		Nuclear scale-up	Decadal percentage point increase in the nuclear share in electricity generation	5 pp	10 pp	Brutschin et al. (2021); Markard et al. (2020); Wilson et al. (2020)
	New Technologies	BECCS scale-up	Amount of CO ₂ captured in a given year	3 GtCO ₂ yr ⁻¹	7 GtCO ₂ yr ⁻¹	Warszawski et al. (2021)
		Fossil CCS scale-up	Amount of CO ₂ captured in a given year	3.8 GtCO ₂ yr ⁻¹	8.8 GtCO ₂ yr ⁻¹	Budinis et al. (2018)
		Biofuels in transport scale-up	Decadal percentage point increase in the share of biofuels in the final energy demand of the transport sector	5 pp	10 pp	Nogueira et al. (2020)
		Electricity in transport scale-up	Decadal percentage point increase in the share of electricity in the final energy demand of the transport sector	10 pp	15 pp	Muratori et al. (2021)
Socio-cultural	Total/transport/industry/residential energy demand decline	Decadal percentage decrease in demand	10 %	20 %	Grubler et al. (2018)	
	Decline of livestock share in food demand	Decadal percentage decrease in the livestock share in total food demand	0.5 pp	1 pp	Grubler et al. (2018); Bajželj et al. (2014)	
	Forest cover increase	Decadal percentage increase in forest cover	2 %	5 %	Brutschin et al. (2021)	
	Pasture cover decrease	Decadal percentage decrease in pasture cover	5 %	10 %	Brutschin et al. (2021)	
Institutional	Governance level and decarbonisation rate	Governance levels and per capita CO ₂ emission reductions over a decade	>0.6 and <20%	<0.6 and >20%	Brutschin et al. (2021); Andrijevic et al. (2020b)	

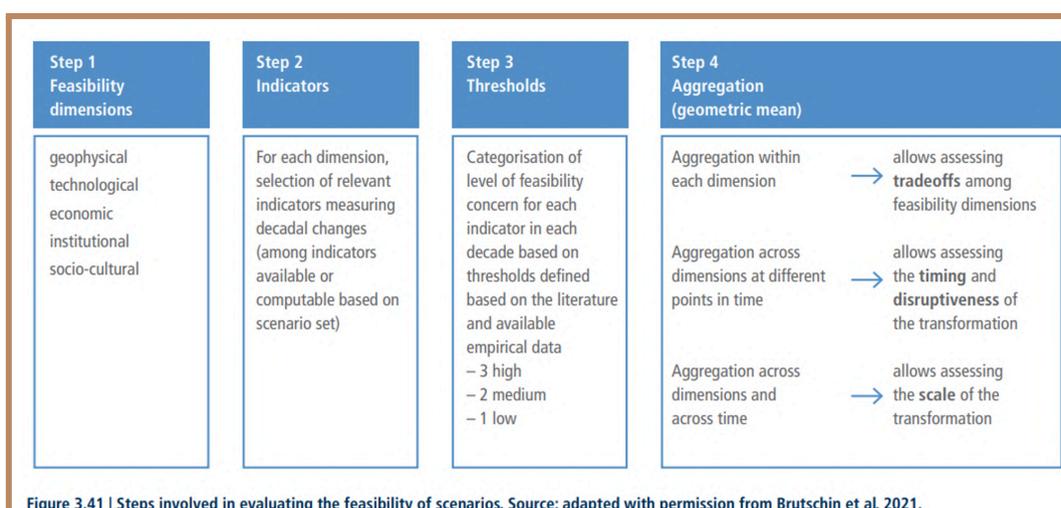
La faisabilité d'un scénario est donc évaluée sur **6 axes** qui correspondent à une synthèse de critères. Et ce, **à chaque pas de temps**, tous les 10 ans. Imaginons que nous étudions un scénario entre 2020 et 2100. Cela représente 9 pas de temps multipliés par 6 axes, soit 48 valeurs. Si nous considérons tous les C1, c'est-à-dire 97 scénarios, nous obtenons 5 238 valeurs. Ça fait beaucoup ! Comment y voir clair ? Un scénario est-il faisable s'il est faisable sur tous les critères de tous les pas de temps ? S'il est faisable en moyenne ? Nous avons envisagé plusieurs approches pour répondre à ce problème :

- Agréger les scénarios **par axes et au global** pour avoir une vision d'ensemble sur chaque scénario, à n'importe quel moment dans le temps.
- Agréger les scénarios **sur l'horizon temporel** pour étudier le caractère perturbateur de chaque transformation sur une longue période temporelle.
- Résumer les résultats en **réduisant la dimension du problème**, pour obtenir des données plus simples à manipuler.

Ces manipulations permettent l'obtention de résultats plus tangibles et plus facilement analysables, comme présenté dans la partie suivante.

Méthodes d'agrégation

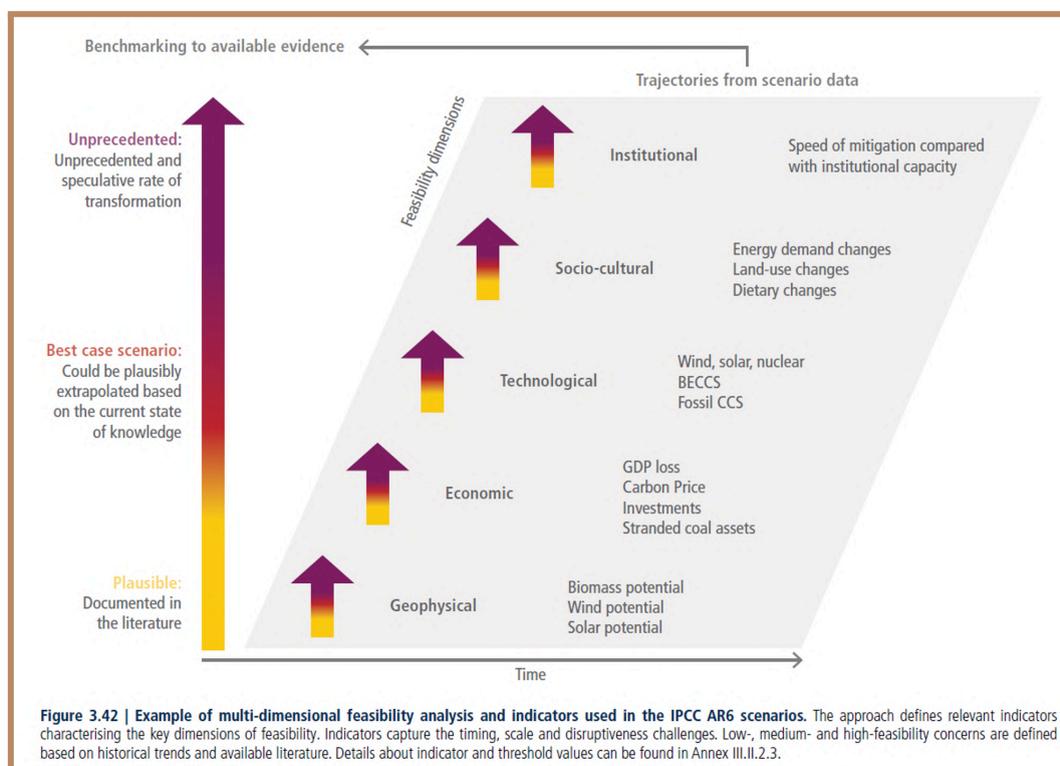
Après avoir déterminé la valeur de faisabilité (un nombre entier entre **1** et **3**) pour chaque pas de temps et chaque sous-axe, nous agrégeons nos résultats pour simplifier notre problème. Il existe différentes méthodes, chacune permettant d'évaluer différentes caractéristiques. Le choix de l'approche dépend donc des critères que nous souhaitons privilégier. Ces approches sont présentées à la figure 3.41 du chapitre "*Mitigation Pathways Compatible with Long-term Goals*" ([**Figure 3.41, Chapter 3 AR6 WGIII, 380**]), et plus précisément à la quatrième étape (les autres étapes résument ce que nous avons présenté précédemment) :



La quatrième étape pouvant être traduite par :

Méthode	Résultats
Agrégation au sein de chaque dimension .	Permet d'évaluer les compromis entre les dimensions de la faisabilité.
Agrégation entre dimensions à différents points dans le temps .	Permet d'évaluer le timing et le caractère perturbateur de la transformation.
Agrégation entre dimensions et dans le temps .	Permet d'évaluer l'ampleur de la transformation.

L'approche générale est également présentée de manière plus visuelle avec la figure 3.42 du WGIII ([Figure 3.42, Chapter 3 AR6 WGIII, 380]) :



Puisque nous cherchons à obtenir un seul scénario médian final couvrant tout le XXI^e siècle, nous agrégeons les valeurs de faisabilité sur tout l'horizon temporel, soit de 2020 à 2100, en séparant la valeur de faisabilité résultante sur chaque axe et la valeur de faisabilité globale du scénario. En d'autres termes, nous calculons 6 valeurs pour chacun des scénarios :

- Pour chaque axe, nous calculons la valeur moyenne de faisabilité **sur le siècle** (*agrégation au sein de chaque dimension*). Nous obtenons 5 valeurs, chacune décrivant le niveau de préoccupation de l'axe sur le reste du siècle.

- Pour chaque scénario, nous calculons la valeur moyenne de faisabilité de **tous les axes sur tout l’horizon temporel** (*agrégation entre dimensions et dans le temps*). Nous obtenons 1 valeur qui décrit la faisabilité globale du scénario.

Une fois les quantifications obtenues, il est également possible de revenir à un classement qualitatif avec la règle :

- Un scénario est estimé “**Low**” si la valeur agrégée de faisabilité est dans [1; 1.5].
- Un scénario est estimé “**Medium**” si la valeur agrégée de faisabilité est dans [1.5; 2.5].
- Un scénario estimé “**High**” si la valeur agrégée de faisabilité est dans [2.5; 3].

Sur le plan technique, et indépendamment de la méthode choisie, l’agrégation se fait à partir d’une **moyenne géométrique**. Cette approche non compensatoire permet de limiter la substituabilité entre les indicateurs.

La méthode d’agrégation, bien que très intéressante, comporte certaines failles que nous tenterons de corriger dans une prochaine itération. Pour aller plus loin, voir la partie « Limites et autres remarques ».

Les faisabilités des différents axes étant maintenant quantifiées et agrégées, nous pouvons définir une condition de filtrage sur nos scénarios C1.

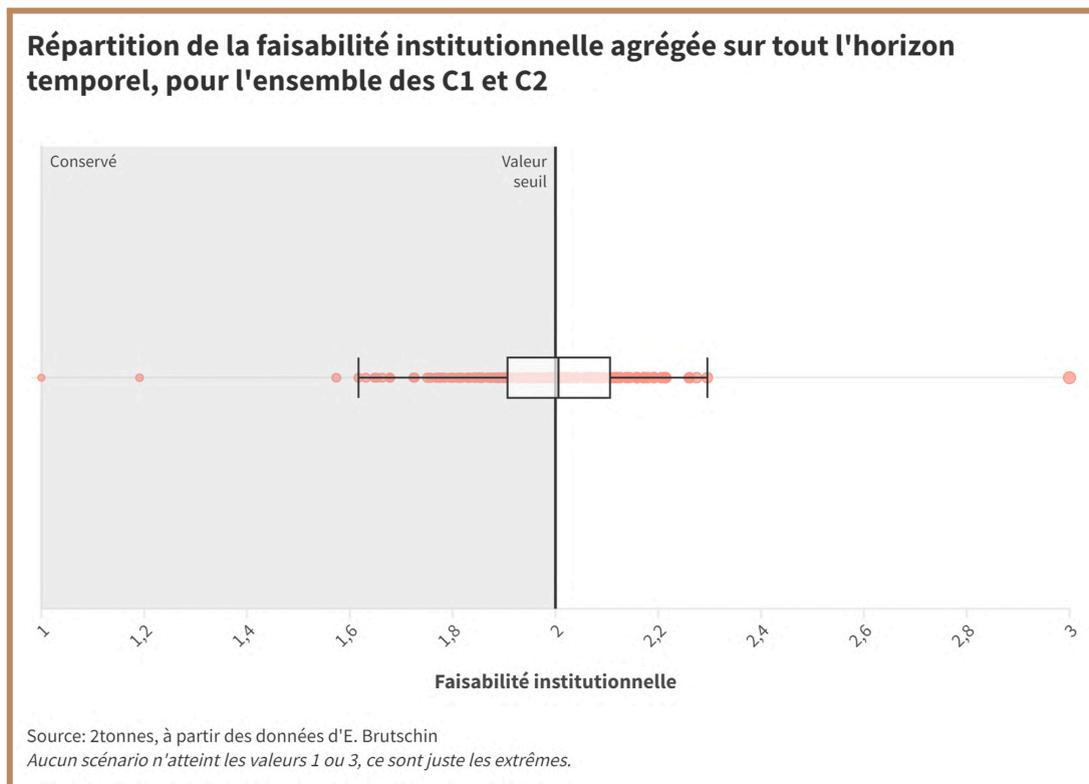
Condition de filtrage par faisabilité

À partir des 6 quantifications (les cinq axes et la faisabilité globale), nous choisissons de contraindre l’espace des scénarios en appliquant la règle suivante : nous gardons uniquement les scénarios dont **chacune** des 6 valeurs de faisabilité ne dépasse pas la **valeur seuil de 2**. Cette valeur englobe au pire des scénarios avec des faisabilités au niveau “**Medium**”, tout en écartant ceux trop proches du niveau “**High**”.

Cela permet :

- De s’assurer que chaque scénario ne présente pas, **dans son ensemble**, des transformations qui sont peu susceptibles de se réaliser.
- De s’assurer que chaque scénario n’avance pas des transformations problématiques **localement** (c’est-à-dire sur une des dimensions).
- D’étudier **distinctement** les contraintes qui s’exercent sur chacun des 6 axes pour déterminer la nature et l’importance des obstacles potentiels.
- De contrôler le **seuil d’acceptabilité** des transformations.

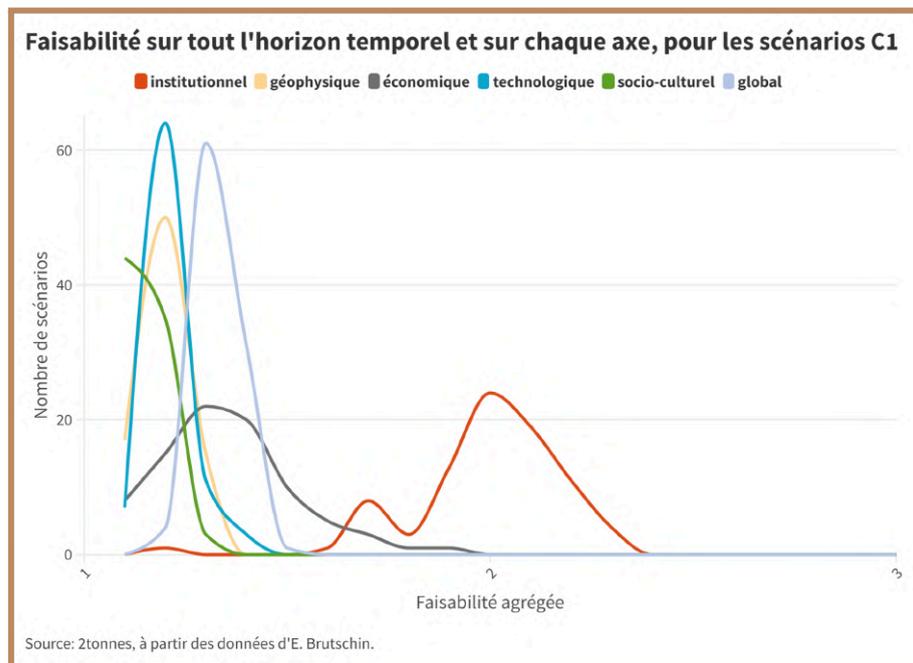
Dans la suite, les résultats présentés avec filtrage respectent **tous** cette condition.



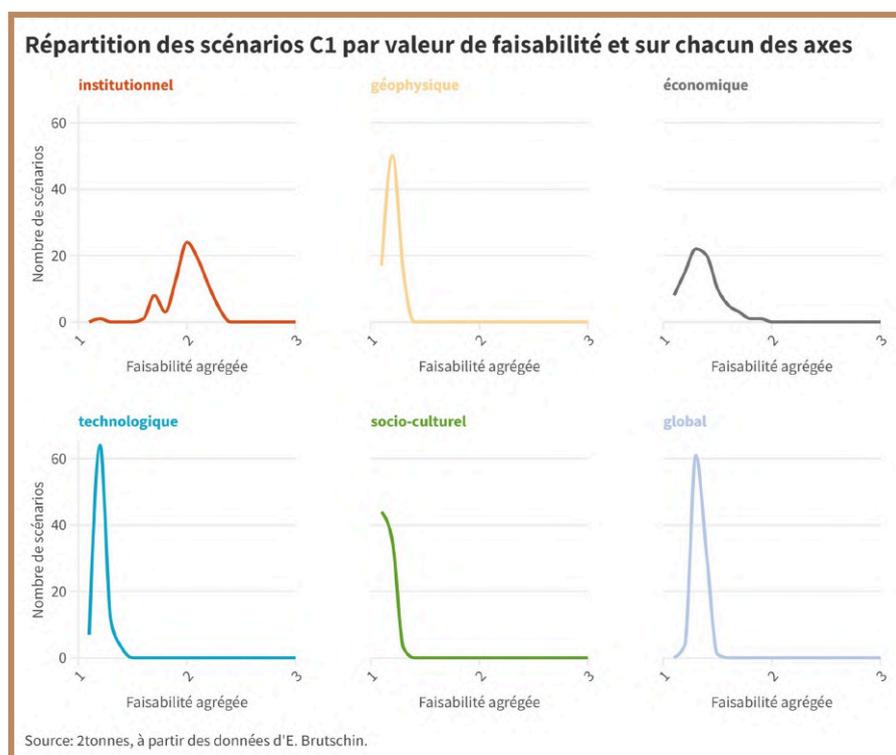
Boxplot illustrant l'utilisation de la faisabilité : tous les scénarios dans la zone grise (en dessous de 2) seront conservés. Les autres ne passeront pas le filtre de faisabilité pour l'axe institutionnel. La valeur médiane est de 2,01.

Résultats de la faisabilité

Voici les valeurs de faisabilité obtenues après agrégations sur les axes pour l'ensemble des C1 :



Ou de manière séparée, axe par axe (toujours sur les C1) :



En complément de ces courbes, le chapitre 3 du WGIII ([**Chapitre 3 SPM AR6 WGIII, 301**]) nous donne quelques enseignements essentiels et renforce l'analyse que nous pouvons en faire :

- Les différentes voies d'atténuation sont associées à des défis de faisabilité différents, même si des conditions favorables appropriées peuvent réduire ces défis (confiance élevée). *Les défis de faisabilité sont transitoires et concentrés sur les deux ou trois prochaines décennies (confiance élevée). Ils sont multidimensionnels, dépendants du contexte et malléables en fonction des tendances politiques, technologiques et sociétales.*
- Les voies d'atténuation sont associées à d'importants problèmes de faisabilité **institutionnelle** et **économique** plutôt que technologique et géophysique (confiance moyenne). *Le rythme rapide du développement et du déploiement technologiques dans les voies d'atténuation n'est pas incompatible avec les données historiques. La capacité institutionnelle est plutôt un facteur limitant clé pour une transition réussie.*
- Les voies qui s'appuient sur un large éventail de stratégies d'atténuation sont plus robustes et plus résilientes (confiance élevée). *Les portefeuilles de solutions technologiques réduisent les risques de faisabilité associés à la transition bas carbone.*

Notes supplémentaires sur la faisabilité

Le concept de faisabilité reste un sujet complexe sur lequel nous avons encore beaucoup à apprendre. Il reste intéressant de préciser quelques points clés :

- Les seuils de faisabilité géophysique se basent sur les potentiels technologiques, c'est-à-dire la prise en compte des limites géophysiques ainsi que des limites technologiques potentielles.
- L'axe institutionnel peut sembler problématique car il est le seul à avoir un seul indicateur (même s'il s'agit d'un couple), tandis que les autres sont décomposés en plusieurs sous-axes. En réalité, l'axe institutionnel est déjà le résultat d'une agrégation complexe de différentes sous-variables. Pour en savoir plus, il est conseillé de se référer au *Supplementary Material* de Brutschin et al. (2021) (voir [16]).
- Pour plus d'informations sur les concepts de la faisabilité, l'intervention d'E. Brutschin au "*Scenario Forum*" (voir [17] à 37 min 11) est une ressource idéale.

L'IIASA héberge également un tableau de bord (voir [18]) permettant de jouer avec les seuils de faisabilité sur les scénarios du SR1.5. Cette ressource est d'une aide précieuse pour mieux comprendre le fonctionnement de la faisabilité et la répartition des scénarios le long des différents axes.

Apports de la faisabilité

Finalement, l'intégration de la faisabilité, une approche rigoureuse et pertinente, bien que perfectible, nous permet de porter un autre regard sur nos scénarios. Ces travaux de faisabilité nous ont permis d'avoir un recul général sur les défis majeurs, notamment les défis technologiques, et de comprendre qu'ils sont réalisables, sans qu'ils soient minimes. Aussi, cette approche nous permet de différencier les scénarios plus concrètement et non seulement en termes d'évolution des émissions.

Obtention de l'équation

En raison de la nature de notre principale source de données (i.e. la base de données de l'IIASA), certaines étapes intermédiaires sont nécessaires pour aboutir à une estimation de l'objectif 2050. En effet, les émissions brutes ne sont pas explicitement présentées. Pour les obtenir, nous partons des émissions nettes et nous re-composons l'absorption d'origine anthropique, découpée par technologie de capture. L'approche utilisée est détaillée dans la suite.

Définition des variables

Cette section détaille le calcul aboutissant à l'équation d'estimation des émissions par an et par personne en 2050. Nous partons de l'ensemble des scénarios s appartenant au cadre de l'étude précédemment défini, i.e. $\{s \in C_1\}$. Nous introduisons également les notations suivantes :

$E_{\text{per capita}}^s$ in 2050	=	une variable du scénario s
$E_{\text{gross GHG}}$ in 2050	=	émissions en moyenne par personne en 2050
$E_{\text{net GHG}}$ in 2050	=	émissions brutes mondiales de GES en 2050
$E_{\text{negative CO2}}$ in 2050	=	émissions nettes mondiales de GES en 2050
$H_{\text{world population}}$ in 2050	=	émissions négatives mondiales de GES en 2050
	=	population mondiale en 2050

Calcul des émissions brutes par personne en 2050

En comptant l'élimination anthropique du CO₂ positivement, les émissions brutes en 2050 **pour chaque scénario** sont obtenues selon :

$$E_{\text{gross GHG}}^s \text{ in 2050} = E_{\text{net GHG}}^s \text{ in 2050} - E_{\text{negative CO2}}^s \text{ in 2050}$$

Nous normalisons les émissions par la population mondiale projetée par l'ONU (9,7 milliards en 2050) :

$$E_{\text{per capita in 2050}}^s = \frac{E_{\text{gross GHG in 2050}}^s}{H_{\text{world population in 2050}}}$$

Ce qui donne finalement :

$$E_{\text{per capita in 2050}}^s = \frac{E_{\text{net GHG in 2050}}^s - E_{\text{negative CO2 in 2050}}^s}{H_{\text{world population in 2050}}} \quad (1)$$

Calcul des émissions négatives

Pour rappel, la base de données de l'IIASA nous fournit les émissions négatives décomposées en six grandes familles :

Méthode de capture	Abréviation
Carbon Capture and Storage	CCS
Direct Air Carbon Capture	DAC
Enhanced Weathering	EW
Land Use	LU
Feedstocks	F
Other	O

En partant de nouveau de l'équation (1), dans laquelle les émissions négatives sont renommées CDR :

$$E_{\text{per capita in 2050}}^s = \frac{E_{\text{net GHG in 2050}}^s - \text{CDR}_{\text{total}}^s}{H_{\text{world population in 2050}}}$$

Et en détaillant pour **chacun** des scénarios en fonction des méthodes de capture existantes, nous obtenons une égalité uniquement exprimée en fonction des variables extraites de l'IIASA et de l'ONU :

$$E_{\text{per capita in 2050}}^s = \frac{E_{\text{net GHG in 2050}}^s - (\text{CDR}_{\text{CCS}}^s + \text{CDR}_{\text{DAC}}^s + \text{CDR}_{\text{EW}}^s + \text{CDR}_{\text{LU}}^s + \text{CDR}_{\text{F}}^s + \text{CDR}_{\text{O}}^s)}{H_{\text{world population in 2050}}}$$

Agrégation et équation finale

Finalement, puisque l'on considère **tous les C1**, nous obtenons après agrégation sur l'ensemble des scénarios notre **équation finale** :

$$E_{\text{per capita in 2050}}^{C1} = \frac{\text{Mediane}_{s \in C1}(E_{\text{net GHG in 2050}}^s - \text{CDR}_{\text{total}}^s)}{H_{\text{world population in 2050}}} \quad (2)$$

Notons que nous pouvons rester à l'échelle mondiale pour analyser les scénarios, avec :

$$E_{\text{gross GHG in 2050}}^{C1} = \text{Mediane}_{s \in C1}(E_{\text{net GHG in 2050}}^s - \text{CDR}_{\text{total}}^s) \quad (3)$$

Nous notons que :

- La formule finale ici établie est transposable à **n'importe quelle** échéance temporelle : elle peut autant être utilisée pour 2050 que pour 2030 ou 2100.
- Les émissions nettes et négatives sont agrégées avec une **même médiane**. Cela permet de s'assurer de la cohérence de l'approche, en conservant la corrélation entre les émissions nettes et négatives.
- Les émissions négatives englobent **l'ensemble** des solutions d'absorption anthropique, allant de la reforestation à l'utilisation de biomasse pour produire de l'énergie avec stockage géologique.
- Nous optons pour une **approche moyenne** : les émissions par habitant sont définies à partir des émissions mondiales, moyennées par personne. Cette approche est questionnée dans la partie « *Limites et autres remarques* ».

Conclusions sur le cadre et l'approche méthodologique

En résumé, nous avons décrit nos trois principaux blocs d'hypothèses :

- Tout d'abord, nous revenons sur les objectifs climatiques et limitons notre périmètre d'étude aux **scénarios de classe C1**. Ce premier filtrage est essentiel pour assurer la pertinence de notre analyse.
- Ensuite, nous avons effectué un **filtrage par faisabilité** afin d'exclure les scénarios dont certaines transformations sont jugées "unprecedented". Cette étape nous permet de nous concentrer sur les scénarios réalistes et réalisables, garantissant ainsi la validité de nos conclusions.
- Enfin, nous avons développé une équation permettant d'estimer les **émissions brutes en moyenne par personne en 2050**. Cette équation est basée sur un ensemble de scénarios soigneusement sélectionnés, ce qui nous permet d'obtenir des résultats fiables et précis.

Avec ces éléments, nous sommes désormais en mesure d'estimer un scénario médian d'émissions par personne, avec prise en compte de la faisabilité et tout au long du XXI^e siècle.

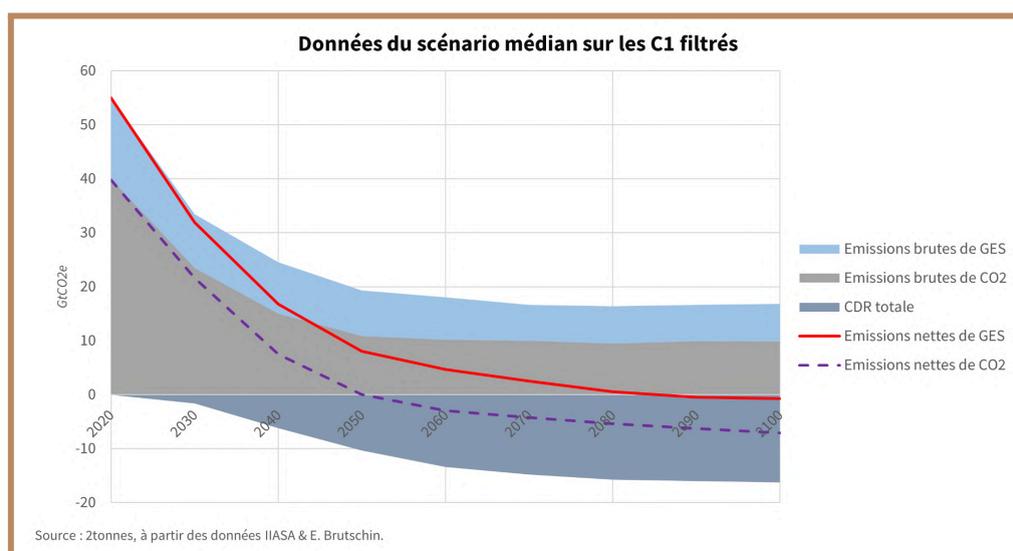
Résultats

Scénario médian

Le cadre défini précédemment établit les deux critères de filtrage des scénarios :

- Leur classe doit être “C1”, c’est-à-dire qu’ils doivent limiter le réchauffement à +1,5°C en 2100 avec une probabilité supérieure à 50%, sans ou avec faible dépassement.
- Leurs faisabilités (sur les cinq axes et la valeur globale) doivent toutes être inférieures à 2 sur la période 2020-2100.

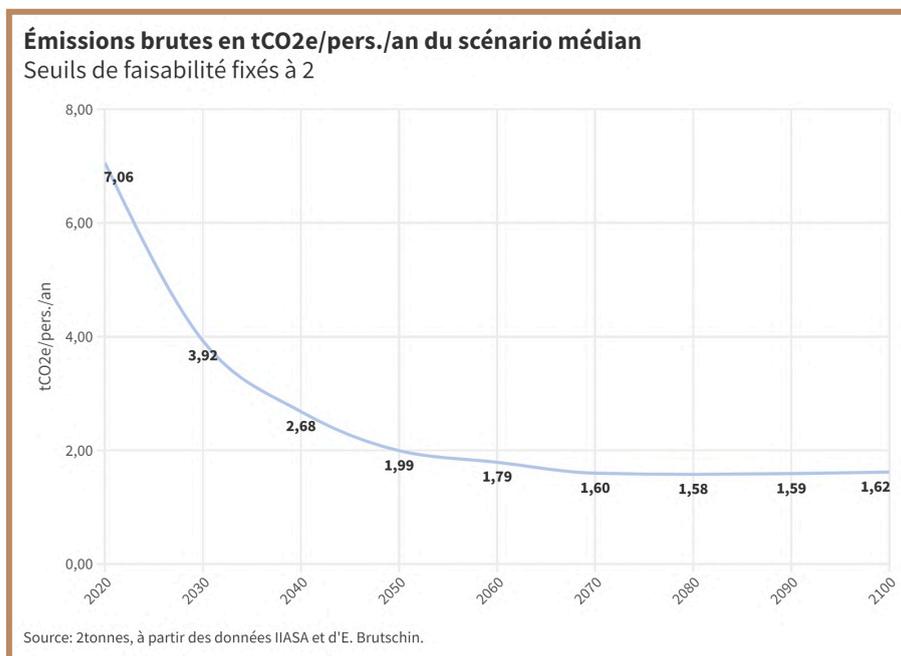
À partir de ces **deux conditions** et de l’équation définie précédemment (équation (3)), **63 scénarios sur 97 passent le filtre** et nous permettent de construire un scénario médian à l’échelle mondiale :



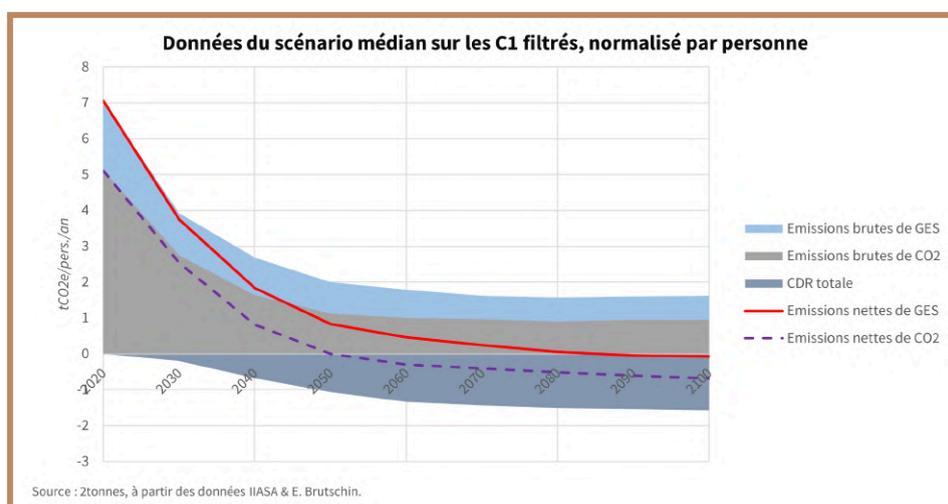
N. B. : les variables sont estimées à partir de médianes distinctes, ce qui ne rend pas possible la réalisation de totaux par somme des valeurs.

Notons qu’avec cette agrégation, nous aboutissons à la **neutralité carbone vers 2050 et tous gaz à effet de serre en 2100.**

En utilisant cette fois l'équation (2), nous construisons le scénario de transition médian d'émissions brutes et à l'échelle individuelle. Ce scénario conduit à des émissions moyennes de **1,99 tCO₂e/pers./an en 2050** :



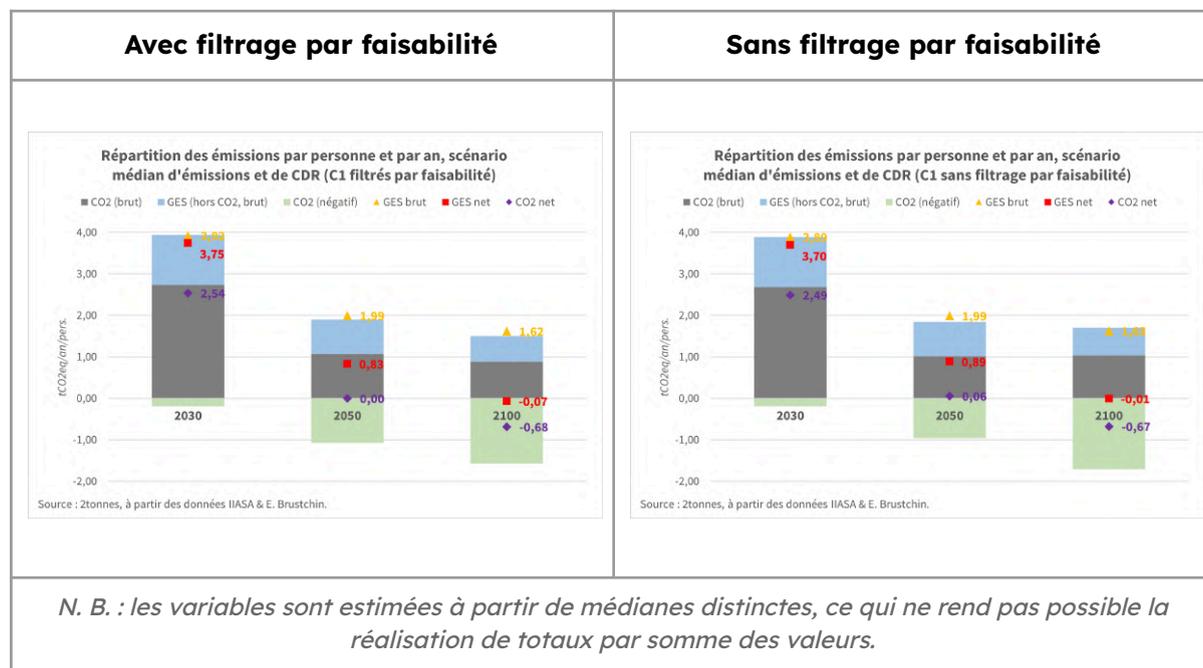
Ou, en détaillant les émissions brutes normalisées avec les émissions nettes et la CDR :



N. B. : les variables sont estimées à partir de médianes distinctes, ce qui ne rend pas possible la réalisation de totaux par somme des valeurs.

Écart avec et sans filtrage sur les C1

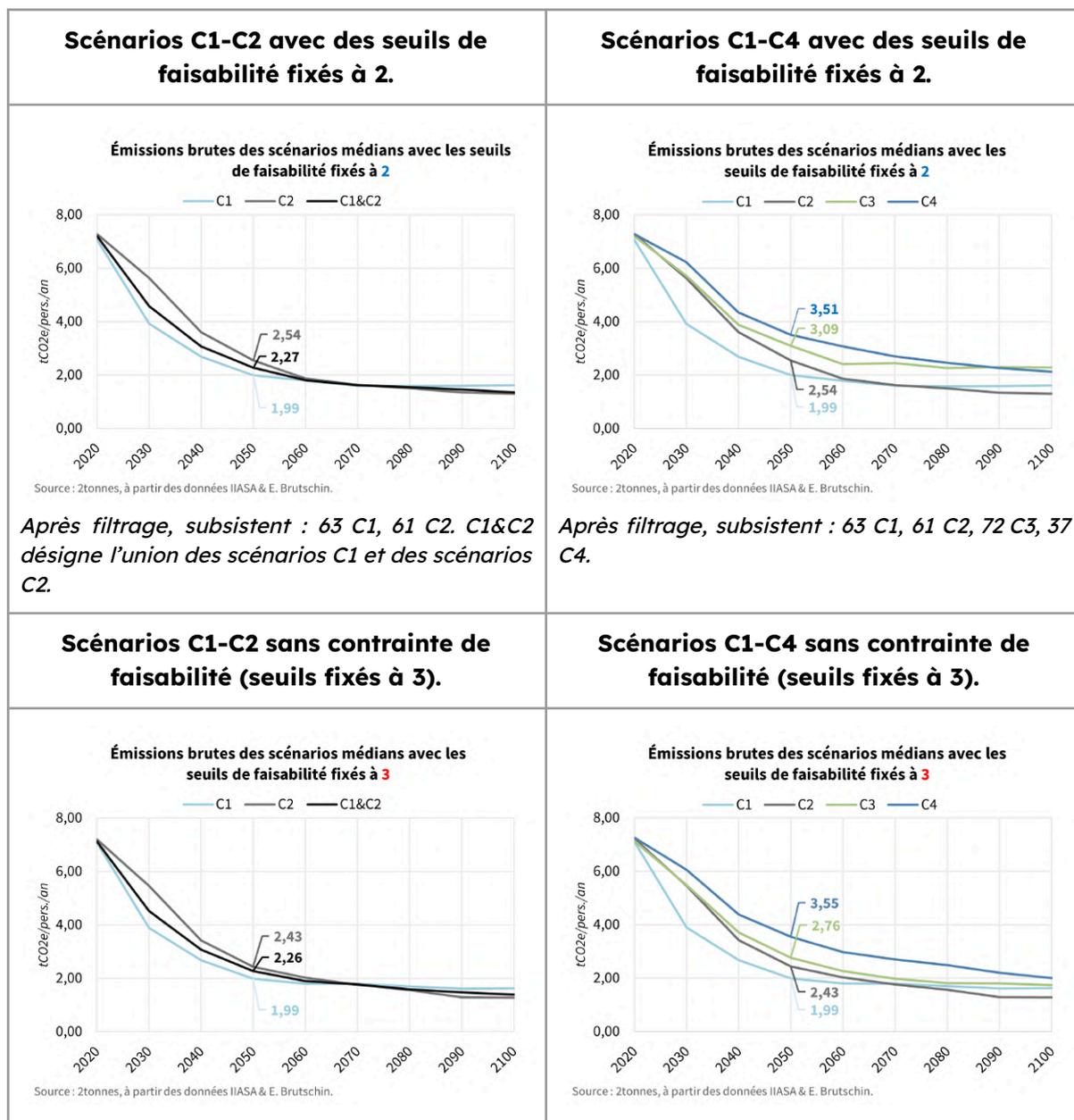
Voici la décomposition des scénarios médians C1 avec et sans filtrage, pour les points de passage en 2030, 2050 et 2100 :



Même si le filtrage écarte un tiers des scénarios, les résultats restent sensiblement similaires : les C1 avec et sans filtrage passent **tous les deux par 1,99 tCO₂e/pers./an en 2050**. Nous observons tout de même de légères différences en 2030 et en 2100. Pour 2030, les scénarios filtrés proposent des réductions moins importantes, entre autres à cause du seuil institutionnel sur les réductions décennales des émissions de CO₂ par personne (<20%). Pour 2100, nous retrouvons un recours plus faible à la CDR dans les scénarios avec filtrage (-1,57 tCO₂e/pers./an, contre -1,71 tCO₂e/pers./an sans filtrage) et des émissions brutes légèrement plus faibles.

Élargissement aux scénarios C2, C3 et C4

Les résultats compilés pour les autres ensembles de scénarios sont présentés ci-dessous. Ces courbes offrent un élément de comparaison avec les résultats présentés pour les C1, tout en permettant d'appréhender les implications que peuvent avoir des C2, C3 ou C4 en termes d'émissions à moyen / long terme. La catégorie "C1&C2" désigne l'ensemble des scénarios appartenant à la classe C1 ou C2.



En somme, nous pouvons estimer les points de passage pour les autres catégories climatiques :

- **2,27 tCO₂e/pers./an** en 2050 pour les scénarios qui limitent le réchauffement à +1.5°C (>50%) avec faible ou fort dépassement (**C1&C2**).
- **2,43 tCO₂e/pers./an** en 2050 pour les scénarios qui limitent le réchauffement à +1.5°C (>50%) avec fort dépassement (**C2**).
- **3,09 tCO₂e/pers./an** en 2050 pour les scénarios qui limitent le réchauffement à +2°C (>67%) (**C3**).
- **3,51 tCO₂e/pers./an** en 2050 pour les scénarios qui limitent le réchauffement à +2°C (>50%) (**C4**).

Conclusions

Limites et autres remarques

Limites

Malgré notre volonté d'être le plus rigoureux possible dans notre analyse de l'AR6, plusieurs limites subsistent. Ces limites pourraient avoir des impacts plus ou moins forts sur les résultats et leurs interprétations. Nous avons cherché à qualifier les impacts potentiels avec la nomenclature suivante :

Impact	Signification	Nombre de fois
Faible	Entraîne une variation négligeable en ordre de grandeur et/ou n'a pas d'influence sur sa signification et la pertinence des interprétations du résultat.	4
Modéré	Entraîne une variation faible en ordre de grandeur et/ou a une influence potentielle sur sa signification et la pertinence des interprétations du résultat.	3
Fort	Entraîne une variation forte en ordre de grandeur et/ou remet en question la signification et la pertinence des interprétations du résultat.	0

Voici une liste des principales approximations et de leurs conséquences :

Non exhaustivité de la faisabilité - impact faible

Un ensemble assez large de solutions d'atténuation, telles que les dispositifs de capture directe de l'air (DAC) et l'afforestation/reforestation, ne sont pas abordées de manière approfondie en termes de faisabilité. Ces lacunes nous ont directement été expliquées par E. Brutschin et sont justifiées par plusieurs raisons : la représentation déjà importante des technologies d'absorption, des contraintes principalement situées sur la phase de capture (ce qui est représenté dans les autres sous-axes), des incertitudes fortes sur ces technologies, l'utilisation limitée de ces méthodes, etc. Bien que la modélisation de la faisabilité ne soit pas exhaustive, elle **couvre néanmoins l'essentiel**. Pour compléter notre démarche, le tableau 12.6 du chapitre "Cross-sectoral Perspectives" ([Tableau 12.6, Chapitre 12 AR6 WGIII, 1275]), propose des "potentiels d'atténuation", bien qu'il soit compliqué de les utiliser tels quels dans notre contexte.

Table 12.6 | Summary of status, costs, potentials, risk and impacts, co-benefits, trade-offs and spillover effects and the role in mitigation pathways for CDR methods. Technology readiness level (TRL) is a measure of maturity of the CDR method. Scores range from 1 (basic principles defined) to 9 (proven in operational environment). Author judgement ranges (assessed by authors in the literature) are shown, with full literature ranges shown in brackets.

CDR method	Status (TRL)	Cost (USD tCO ₂ ⁻¹)	Mitigation Potential (GtCO ₂ yr ⁻¹)	Risk and impacts	Co-benefits	Trade-offs and spillover effects	Role in modelled mitigation pathways	Section
DACCS	6	100–300 (84–386)	5–40	Increased energy and water use	Water produced (solid sorbent DAC designs only)	Potentially increased emissions from water supply and energy generation	In a few IAMs; DACCS complements other CDR methods	12.3.1.1
Enhanced weathering	3–4	50–200 (24–578)	2–4 (<1–95)	Mining impacts; air quality impacts of rock dust when spreading on soil	Enhanced plant growth, reduced erosion, enhanced soil carbon, reduced soil acidity, enhanced soil water retention	Potentially increased emissions from water supply and energy generation	In a few IAMs; EW complements other CDR methods	12.3.1.2
Ocean alkalinity enhancement	1–2	40–260	1–100	Increased seawater pH and saturation states may impact marine biota. Possible release of nutritive or toxic elements and compounds. Mining impacts	Limiting ocean acidification	Potentially increased emissions of CO ₂ and dust from mining, transport and deployment operations	No data	12.3.1.3
Ocean fertilisation	1–2	50–500	1–3	Nutrient redistribution, restructuring of the ecosystem, enhanced oxygen consumption and acidification in deeper waters, potential for decadal-to-millennial-scale return to the atmosphere of nearly all the extra carbon removed, risks of unintended side effects	Increased productivity and fisheries, reduced upper ocean acidification	Subsurface ocean acidification, deoxygenation; altered meridional supply of macro-nutrients as they are utilised in the iron-fertilised region and become unavailable for transport to, and utilisation in, other regions, fundamental alteration of food webs, biodiversity	No data	12.3.1.3
Blue carbon management in coastal ecosystems	2–3	Insufficient data, estimates range from ~100 to ~10,000	<1	If degraded or lost, coastal blue carbon ecosystems are likely to release most of their carbon back to the atmosphere; potential for sediment contaminants, toxicity, bioaccumulation and biomagnification in organisms; issues related to altering degradability of coastal plants; use of subtidal areas for tidal wetland carbon removal; effect of shoreline modifications on sediment redeposition and natural marsh accretion; abusive use of coastal blue carbon as means to reclaim land for purposes that degrade capacity for carbon removal	Potential for many non-climatic benefits and can contribute to ecosystem-based adaptation, coastal protection, increased biodiversity, reduced upper ocean acidification; could potentially benefit human nutrition or produce fertiliser for terrestrial agriculture, anti-methanogenic feed additive, or as an industrial or materials feedstock	If degraded or lost, coastal blue carbon ecosystems are likely to release most of their carbon back to the atmosphere. The full delivery of the benefits at their maximum global capacity will require years to decades to be achieved	Not incorporated in IAMs, but in some bottom-up studies; small contribution	12.3.1.3, 7.4
BECCS	5–6	15–400	0.5–11	Competition for land and water resources, to grow biomass feedstock. Biodiversity and carbon stock loss if from unsustainable biomass harvest	Reduction of air pollutants; fuel security, optimal use of residues, additional income, health benefits and if implemented well can enhance biodiversity, soil health and land carbon	Competition for land with biodiversity conservation and food production	Substantial contribution in IAMs; and bottom-up sectoral studies	7.4

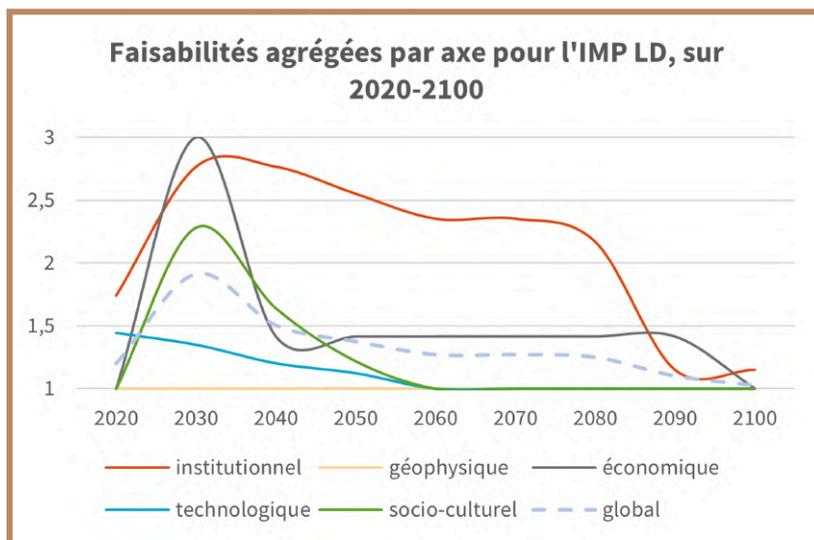
CDR method	Status (TRL)	Cost (USD tCO ₂ ⁻¹)	Mitigation Potential (GtCO ₂ yr ⁻¹)	Risk and impacts	Co-benefits	Trade-offs and spillover effects	Role in modelled mitigation pathways	Section
Afforestation/ reforestation	8–9	0–240	0.5–10	Reversal of carbon removal through wildfire, disease, pests may occur. Reduced catchment water yield and lower groundwater level if species and biome are inappropriate	Enhanced employment and local livelihoods, improved biodiversity, improved renewable wood products provision, soil carbon and nutrient cycling. Possibly less pressure on primary forest	Inappropriate deployment at large scale can lead to competition for land with biodiversity conservation and food production	Substantial contribution in IAMs and also in bottom-up sectoral studies	7.4
Biochar	6–7	10–345	0.3–6.6	Particulate and GHG emissions from production, biodiversity and carbon stock loss from unsustainable biomass harvest	Increased crop yields and reduced non-CO ₂ emissions from soil, resilience to drought	Environmental impacts associated with particulate matter; competition for biomass resource	In development – not yet in global mitigation pathways simulated by IAMs	7.4
Soil carbon sequestration in croplands and grasslands	8–9	45–100	0.6–9.3	Risk of increased nitrous oxide emissions due to higher levels of organic nitrogen in the soil; risk of reversal of carbon sequestration	Improved soil quality, resilience and agricultural productivity	Attempts to increase carbon sequestration potential at the expense of production. Net addition per hectare is very small; hard to monitor	In development – not yet in global mitigation pathways simulated by IAMs; in bottom-up studies: with medium contribution	7.4
Peatland and coastal wetland restoration	8–9	Insufficient data	0.5–2.1	Reversal of carbon removal in drought or future disturbance. Risk of increased methane emissions	Enhanced employment and local livelihoods, increased productivity of fisheries, improved biodiversity, soil carbon and nutrient cycling	Competition for land for food production on some peatlands used for food production	Not in IAMs but some bottom-up studies with medium contribution	7.4
Agroforestry	8–9	Insufficient data	0.3–9.4	Risk that some land area lost from food production; requires high skills	Enhanced employment and local livelihoods, variety of products, improved soil quality, more resilient systems	Some trade-off with agricultural crop production, but enhanced biodiversity, and resilience of system	No data from IAMs, but in bottom-up sectoral studies, with medium contribution	7.4
Improved forest management	8–9	Insufficient data	0.1–2.1	If improved management is understood as merely intensification involving increased fertiliser use and introduced species, then it could reduce biodiversity and increase eutrophication	In case of sustainable forest management, it leads to enhanced employment and local livelihoods, enhanced biodiversity, improved productivity	If it involves increased fertiliser use and introduced species, it could reduce biodiversity and increase eutrophication and upstream GHG emissions	No data from IAMs, but in bottom-up sectoral studies with medium contribution	7.4

Résumé des méthodes de CDR et de leurs caractéristiques principales

Agrégation de la faisabilité - impact modéré

L'agrégation des faisabilités à travers tout le XXI^e siècle occulte l'urgence et la temporalité à laquelle les transformations doivent advenir. Ainsi, si nous considérons l'IMP LD (pour en savoir plus sur ce scénario, se référer à « *Bonus - les IMPs* ») comme exemple, sa faisabilité économique agrégée **ne traduit pas** les préoccupations localement. Le graphique ci-dessous met en avant la forte variabilité du niveau de préoccupation économique au fil du temps. Nous constatons une valeur maximale en 2030, qualifiée unprecedented (ou **high**), qui diminue rapidement pour être qualifiée plausible (ou **low**) dès 2050. La faisabilité

économique agrégée **quantifiée à 1,42**, et donc qualifiée plausible (ou **low**), ne rend donc pas compte des préoccupations autour de 2030.



À ce jour, notre méthode de synthèse des faisabilités par agrégation simplifie la réalité, et notamment sur l'aspect temporel : nous évaluons la moyenne de la faisabilité, et celle-ci marque parfois d'importantes variabilités qui représentent des phénomènes à faisabilité critique sur une courte période. Ainsi, avec d'autres méthodes d'agrégation, ces périodes critiques pourraient compromettre la faisabilité générale du scénario. Il convient tout de même de noter que, pour l'instant, l'impact demeure limité en termes d'ordre de grandeur des résultats, car les scénarios C1, qu'ils incluent ou non un filtrage, convergent vers un même point de passage à 1,99 tCO₂e/pers./an en 2050.

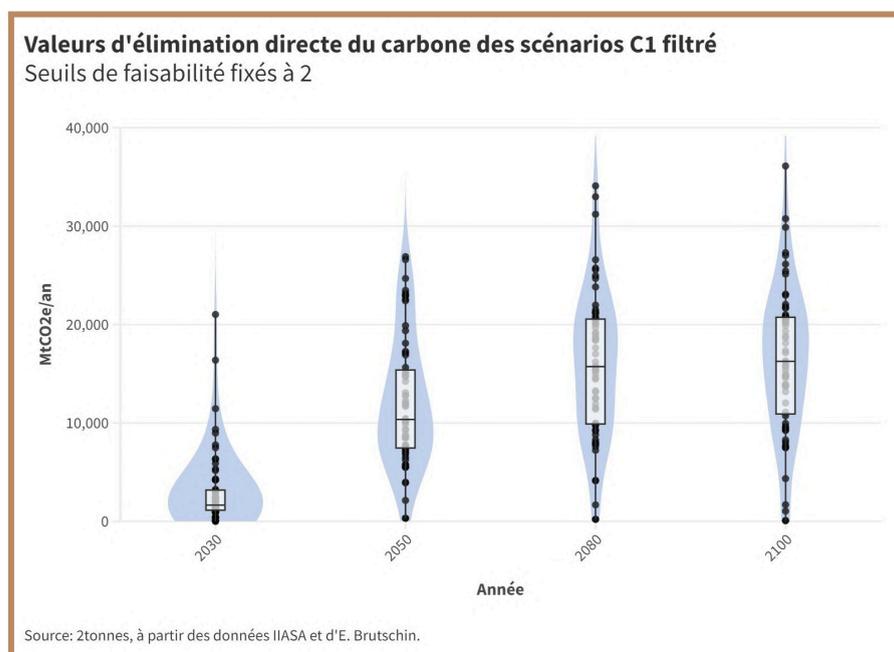
Cette limite, principalement due à notre méthode de filtrage, fait partie des **prochaines améliorations** prévues dans ce travail. Par ailleurs, nos échanges avec E. Brutschin nous ont déjà permis d'identifier des méthodes pertinentes.

Recours à la CDR - impact modéré

En observant les médianes des niveaux de capture et de stockage du carbone des scénarios, nous relevons des valeurs élevées : environ 10 GtCO₂e/an d'ici 2050 et 15 GtCO₂e/an d'ici 2100. Ce constat est d'autant plus flagrant lorsque nous comparons ces résultats à ceux des IMPs (voir « Bonus - les IMPs ») dont les C1 dépassent rarement les quelques GtCO₂e capturées annuellement. En se concentrant sur le scénario le plus proche de la médiane en 2050 (SusDev_SSP2-PkBudg900 du modèle REMIND-MAGPIE 2.1-4.2), nous trouvons :

Valeurs de CDR en 2050 (MtCO ₂ e/an)	
CCS	8 183,15
DAC	155,66
Feedstocks	0
Landuse	234,89
Enhanced Weathering	0
Other	0

De même, si nous examinons les totaux d'élimination directe du carbone pour l'ensemble des scénarios C1 filtrés :



Les valeurs médianes sont : 2030 - 1 654 MtCO₂e ; 2050 - 10 352 MtCO₂e ; 2080 - 15 725 MtCO₂e ; 2100 - 16 249 MtCO₂e

Une fois de plus, nous retrouvons une des limites de notre approche en matière de faisabilité : notre agrégation ne reflète pas concrètement les préoccupations locales des scénarios (cf. point précédent « **Faisabilité** »). Par exemple, le scénario SSP2_SPA2_19I_LI du modèle IMAGE 3.2, propose des valeurs très élevées de CDR : 32 987,87 MtCO_{2e} en 2080. Malgré ces chiffres élevés, ce scénario passe quand même le filtre en raison de valeurs de faisabilité basses sur le début du siècle, ce qui permet à la moyenne de baisser suffisamment (à 1,77) sur l'axe technologique pour passer le filtrage.

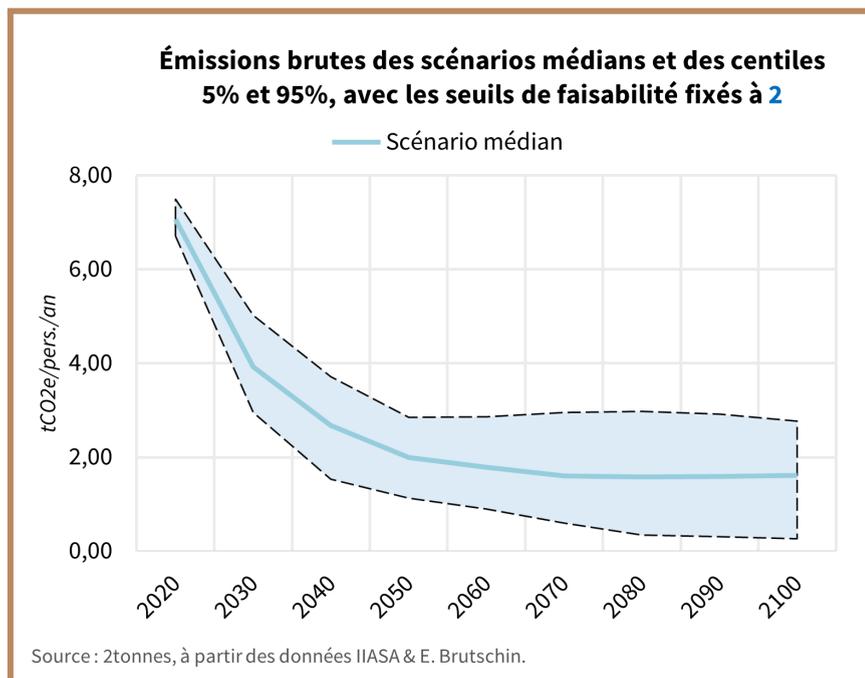
La prochaine itération de ce travail aura pour objectif de lisser ce type de situation en examinant les méthodes d'agrégation de la faisabilité.

Représentativité des scénarios - impact faible

Dans cette étude, il est important de reconnaître certaines limites inhérentes à l'utilisation des scénarios d'atténuation proposés par le WGIII. En effet, la base de données utilisée introduit des biais et ne constitue pas un échantillon statistique représentatif de l'espace hypothétique des modèles et des scénarios : elle ne capture donc pas toute la diversité des transitions possibles. Sans remettre en cause les fondements de notre démarche, cette limite intrinsèque à la modélisation met en lumière les biais existants. Pour aller plus loin, se référer à Peters, G.P., Al Khourdajie, A., Sognaes, I. et al. (2023), voir [5].

Agrégation des scénarios - impact faible

L'agrégation des scénarios C1 à travers un outil mathématique (médiane ou moyenne) n'est pas forcément très représentative. En effet, les scénarios sont très polarisés : dans certains cas, la stratégie de réduction est fondée sur une baisse drastique des émissions, tandis que dans d'autres cas, elle repose sur une baisse plus modérée avec un fort développement de la CDR. Ces différences entraînent également des écarts non négligeables au sein de notre ensemble, comme le montrent les centiles à 5% et 95% :



La valeur du centile 5% est à 1,12 tCO₂e/pers./an en 2050, celle du centile 95% à 2,85 tCO₂e/pers./an en 2050.

La médiane est cependant un outil plus pertinent que la moyenne dans ce cas d'usage. Elle permet d'avoir un **ordre de grandeur unique et clair** qui constitue un **repère puissant** pour comprendre le sujet, contrairement à un intervalle, beaucoup moins clair et accessible pour le grand public. D'ailleurs, c'est généralement la médiane qui est utilisée dans le rapport IPCC AR6 WGIII.

En conclusion, nous pouvons noter que l'utilisation de la médiane n'est pas une limite intrinsèque à la technique, mais plutôt un choix de notre part pour des considérations pédagogiques. Nous estimons que ce choix est pertinent dans le contexte de notre étude.

Population mondiale en 2050 - impact faible

Le travail de projection de l'ONU sur la population mondiale en 2050 pourrait encore être précisé : prise en compte de la régulation des naissances, prise en compte des changements majeurs de risques naturels, etc. Même si les écarts de population sont importants, ils **ne changent pas l'ordre de grandeur de l'objectif**. En effet, nous constatons une variation de l'ordre de la décimale lorsque nous changeons les hypothèses : garder un chiffre rond reste donc une très bonne approximation. Par exemple, en utilisant les valeurs aux bornes de la projection de l'ONU (*lower 95* et *upper 95*) :

- Pour 9 383 742 398 personnes (projection *lower 95*), nous obtenons **2,06 tCO₂e/pers./an en 2050**.
- Pour 10 030 063 621 personnes (projection *upper 95*), nous obtenons **1,93 tCO₂e/pers./an en 2050**.

De même, si nous prenons des valeurs « extrêmes », nous restons dans un intervalle pertinent :

- Pour 8 milliards de personnes, nous obtenons **2,41 tCO₂e/pers./an en 2050**.
- Pour 11 milliards de personnes, nous obtenons **1,76 tCO₂e/pers./an en 2050**.

Il aurait également été pertinent de considérer les populations utilisées pour projeter les scénarios, notamment celle du SSP2, la trajectoire intermédiaire, et à la rigueur celle du SSP1. Ici aussi, les écarts obtenus sur la valeur moyenne en 2050 sont faibles. Nous retrouvons :

- SSP1 = **2,11 tCO₂e/pers./an** avec 9 136 877 566 personnes.
- SSP2 = **2,01 tCO₂e/pers./an** avec 9 593 526 444 personnes.

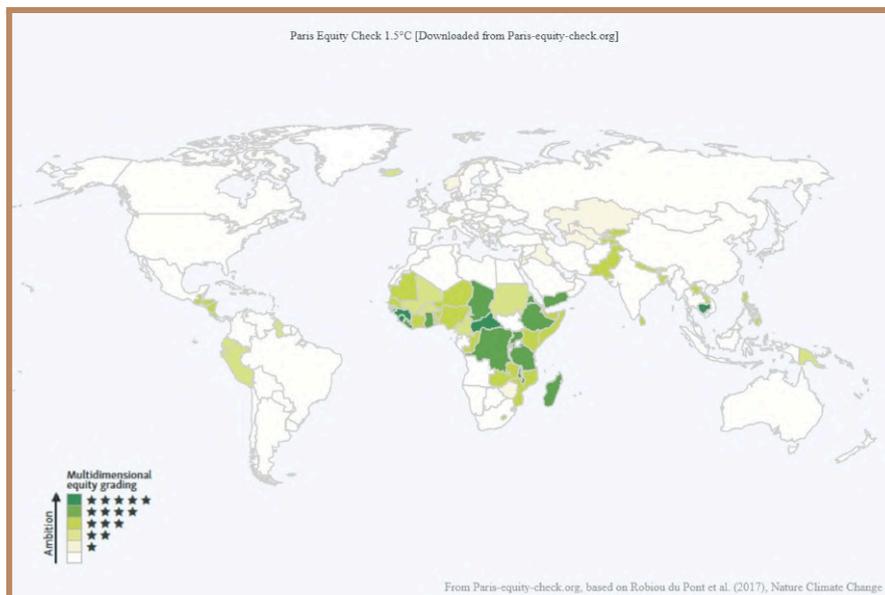
Émissions de 2020 à 2024 - impact modéré

Les émissions réelles de gaz à effet de serre depuis la création des modèles et des scénarios de l'AR6 ne sont pas prises en compte dans les données. Ainsi, les données sont harmonisées pour l'année de référence 2015, mais commencent à diverger dès 2020, alors que les niveaux d'émissions sont connus. Ce point peut rendre certains scénarios moins crédibles, en particulier ceux qui envisagent des réductions importantes dès 2020 et donc très importantes pour 2025 (pour certains, des réductions de -20 GtCO₂e/an d'ici deux ans).

Autres remarques

Équité

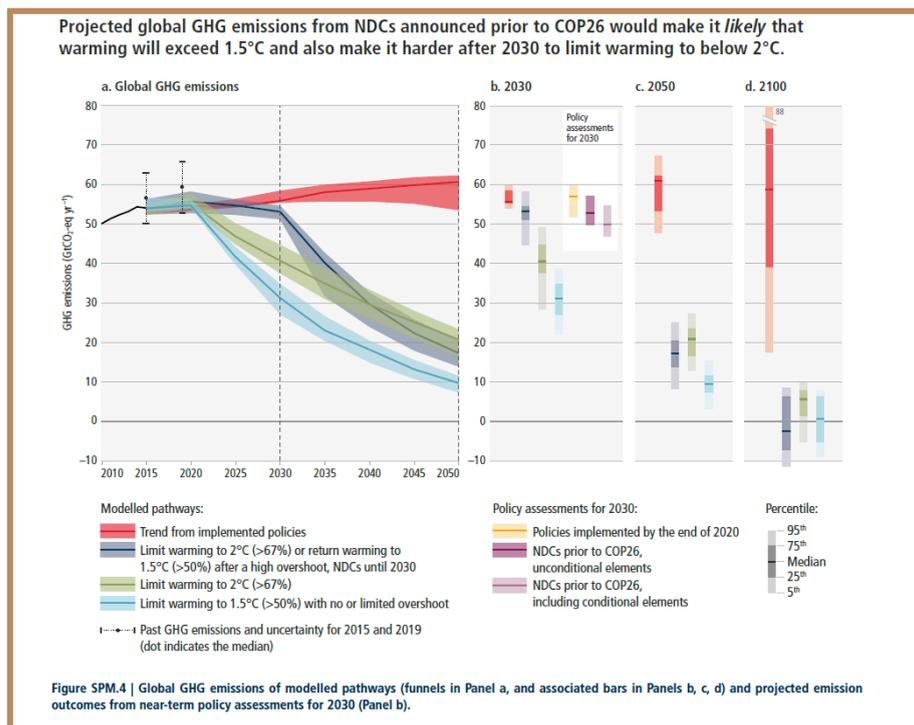
Les pays n'ont pas la même responsabilité passée dans le réchauffement climatique actuel, et n'ont pas les mêmes enjeux locaux. Ainsi l'Accord de Paris parle de "responsabilités communes mais différenciées", et invoque dans son texte le principe d'équité : les pays les plus responsables doivent faire plus d'efforts. Étant donné que ce sont généralement les plus émetteurs aujourd'hui, ce sont ceux qui doivent réduire le plus vite. Mais cela ne s'arrête pas là, et l'interprétation de ce principe peut amener à l'appliquer aussi sur les objectifs d'émissions et de financement à horizon 2050. Ainsi, l'objectif 2050 par personne pourrait varier selon les pays. Il ne faut donc pas voir l'objectif des 2 tonnes comme un objectif absolu pour un pays ou pour un être humain, mais un cap global moyen. Si nous nous concentrons sur la France, le principe d'équité **implique** donc de réduire les émissions moyennes en dessous de 2 tCO₂e/pers./an en 2050 **et/ou** d'atteindre un niveau semblable tout en finançant massivement à l'international, pour accompagner le développement des pays vulnérables. Par exemple, le travail de Yann Robiou du Pont apporte de nombreuses clés de compréhension, notamment à travers le site *Paris Equity Check* (voir [19]).



Paris Equity Check (voir [17]) - planisphère interactif caractérisant les scénarios de transition nationaux à partir de différents critères d'équité.

Contrefactuel : scénario “implemented policies”

Il est intéressant d’avoir un élément de comparaison pour mettre en évidence la profondeur des transformations proposées par les scénarios C1. En utilisant les données de la figure SPM.4 du SPM du WGIII ([Figure SPM.4, SPM AR6 WGIII, 15]), nous estimons rapidement des émissions **nettes** légèrement supérieures à **6 tCO₂e/pers./an en 2050** (~60 GtCO₂e en 2050), soit une valeur 6 fois plus importante que le résultat net obtenu pour les scénarios C1 filtrés. Nous n’avons pas estimé les émissions brutes de “implemented policies”.



Autres résultats

D'autres évaluations des émissions par personne à l'échéance 2050 ont récemment été publiées. Pour cela, nous pouvons notamment nous référer à :

Contenu	Résultat
<p>La trajectoire de réduction de la Stratégie nationale bas-carbone 2 qui aboutit à des émissions territoriales brutes d'environ 1,2 tCO₂e/pers./an en 2050 (voir [20]).</p>	<p>Évolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq). Inventaire CITEPA 2018 et scénario SNBC révisée (neutralité carbone)</p>
<p>Les résultats du rapport “La France face aux neuf limites planétaires” du Service des Données et Études Statistiques (SDES) qui estime les émissions moyennes nettes à 0,9 tCO₂e/pers./an en 2050 pour contenir le réchauffement à +1.5°C (voir [21]).</p>	<p>Graphique 5 : empreinte GES* moyenne annuelle des Français en 2021 et objectifs estimatifs des émissions** moyennes annuelles par personne dans le monde en 2030 et 2050</p> <p>En tonnes de GES/personne/an</p>
<p>Les estimations des empreintes carbone en 2050 pour chaque scénario de "Transition(s) 2050" de l'ADEME donnent des résultats variés, allant de 4,2 tCO₂e/pers./an à 5,8 tCO₂e/pers./an en 2050 (voir [22]).</p>	<p>Graphique 3 : Composition de l'empreinte carbone en 2015 et projection en 2050 selon les scénarios</p>

Ces trois résultats aboutissent à des conclusions assez diverses en raison des différences dans la nature des variables manipulées : la SNBC traite des émissions territoriales brutes, le SDES compare une empreinte carbone avec des émissions nettes moyennes par personne, tandis que l'ADEME se concentre sur des empreintes carbone brutes.

Focus climat

Les autres impacts environnementaux ne sont pas directement considérés à travers nos analyses. Pourtant, même si le focus climat a de nombreuses limites, il a aussi de nombreuses forces. Pour en savoir plus, nous vous invitons à lire l'article de François Laugier « *Se concentrer sur le climat est-il contreproductif ?* » (voir [23]).

Conclusion

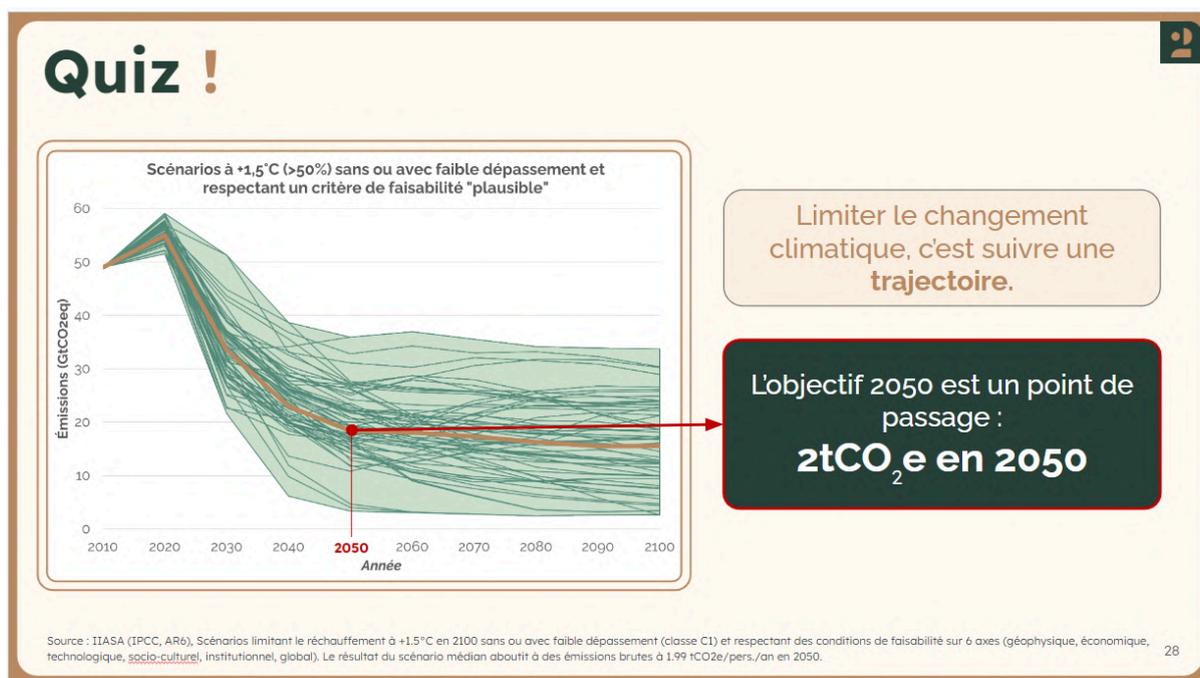
Cette nouvelle étude nous permet de mieux comprendre les enjeux liés aux scénarios de transition proposés par le GIEC. En incorporant un éventail plus vaste d'approches que notre précédente étude sur le SR1.5, elle offre une vision plus large des travaux prospectifs présentés dans l'AR6. Nous avons minutieusement examiné chaque scénario, en nous attardant également sur leurs récits et les messages qu'ils véhiculent. En somme, cette étude nous permet de :

- Mieux comprendre les différences entre un réchauffement de +1,5°C et +2°C, ainsi que les conséquences d'un dépassement. Cela nous permet d'affirmer de nouveau la **nécessité** d'un objectif qui limite le réchauffement à **+1,5°C, sans ou avec un faible dépassement**.
- Mieux appréhender les points de tension de la transition vers une société bas carbone, en termes de types de transformations et de temporalités. Les principales limites sont d'ordre **économique** et **institutionnel**, ce qui renforce notre volonté d'accélérer la transition, notamment en mobilisant les institutions.
- Construire un scénario complet plutôt qu'un simple point de passage à un horizon donné. Cela nous permet d'envisager clairement les implications d'un tel scénario tout au long du siècle. Pour atteindre notre objectif, il est essentiel d'engager des **transformations profondes, rapides et globales dès aujourd'hui**.
- Aborder des questions plus vastes et complexes, telles que l'équité, les émissions négatives ou la compréhension physique des phénomènes naturels. Grâce à cela, nous renforçons la pertinence et la rigueur de notre approche.

Cette nouvelle analyse de l'AR6 est plus approfondie que celle du SR1.5. Nous avons affiné notre compréhension des enjeux pour proposer un cadre aligné sur les récents travaux du GIEC et contribuant à l'objectif de l'Accord de Paris. En considérant un objectif de réchauffement à **+1,5°C sans dépassement** et une population de 9,7 milliards en 2050, la trajectoire de réduction dessinée nous mène à un point de passage à 1,99 tCO₂e/pers./an en 2050, que nous simplifions pour des raisons pédagogiques à **2 tCO₂e/pers./an** en moyenne à l'échelle mondiale. C'est un défi énorme, mais possible. **À nous de jouer.**

Ouverture : la nouvelle slide du Donut

Comme cette note conduit à un résultat technique qui sert à améliorer la base de connaissances d'un atelier à des fins pédagogiques, il est important de se pencher sur la manière dont cette étude est concrètement utilisée par la pédagogie de 2tonnes et comment en tirer le meilleur parti. Voici la nouvelle diapositive de la version "Donut" qui met l'accent sur l'objectif d'émissions :



Cette slide contient une importante quantité d'informations qui peuvent servir à affiner le message pédagogique de l'animateur ou l'animatrice. Nous notons surtout que :

- Ce sont les données **les plus à jour** sur le sujet qui sont utilisées (IPCC AR6).
- Les émissions mondiales sont divisées par les projections de l'ONU sur le nombre d'humains. Nous prenons donc bien en compte les dynamiques démographiques à venir.
- L'objectif fixé est un **réchauffement de +1,5°C (>50%) sans ou avec faible dépassement** à la fin du siècle. C'est ambitieux et souhaitable.
- Le nombre de scénarios est assez limité (63, plus le scénario médian) car ils ont été filtrés selon des critères de faisabilité sur 5 axes généraux : géophysique, économique, technologique, socioculturel et institutionnel. Cette approche nous permet de conserver seulement les scénarios avec les plus grands potentiels de mise en œuvre.
- Ce sont les **émissions brutes** qui sont présentées. Même si ce choix couvre un scope réduit (il manque les émissions négatives), nous abordons une large

gamme d'enjeux ce qui permet de nombreux d'apprentissages. Dans le passé, nous avons essayé d'introduire la notion d'émissions négatives et de neutralité carbone lors de l'atelier. Nous avons fait des tests qui ont révélé un écart significatif en termes d'apports pédagogiques par rapport à l'accessibilité de la formation à l'animation. Par conséquent, nous avons décidé de ne pas aborder ces notions durant l'atelier. Cependant, nous pensons que cela ne nuit pas à la qualité des apprentissages car l'atelier permet de prendre conscience de l'ampleur du défi et balaye un panorama très large, bien qu'incomplet, des solutions, offrant une vision d'ensemble très éclairante des actions à mettre en place.

- ■ La responsabilité historique des émissions n'est pas prise en compte : les émissions sont réparties en moyenne par personne à l'échelle mondiale. Ce choix reflète une volonté de ne pas trancher sur la posture à adopter entre le financement vers d'autres pays et la réduction de nos propres émissions. Aussi, intégrer cette responsabilité dans les objectifs aurait un effet similaire quant à la hauteur de la marche à franchir (de manière simplifiée, 1tonne à la place de 2tonnes), mais cela poserait de nombreux enjeux en termes d'accompagnement pour préserver la motivation des participantes et des participants. Enfin, l'atelier intègre tout de même cette thématique en mettant en avant la nécessité d'apporter un soutien économique aux pays, à l'échelle internationale.
- Le scénario médian représente une tendance globale des C1 qui aboutit à 1,99 tCO₂e/pers./an comme point de passage en 2050 (simplifié en 2 tCO₂e/pers./an). Cet objectif est un **excellent compromis entre puissance pédagogique et rigueur technique**.

Bonus - les IMPs

Définitions

Dans le but d'élargir l'étude des scénarios et d'examiner les différents récits de transition, nous mettons l'accent sur certains d'entre eux spécialement sélectionnés par le GIEC. Ils explorent différentes voies compatibles avec la réalisation des objectifs à long terme de l'Accord de Paris, en matière de température. L'inclusion de ces scénarios spécifiques vise à mieux comprendre leur construction et le poids de chaque hypothèse de transformation. De plus, cela permet de distinguer les narratifs proposés et de mettre en avant leurs différences, sans modifier leur importance dans le résultat global. Par conséquent, bien qu'ils soient l'objet de réflexions et de conclusions, ils ne sont **pas** intégrés à notre résultat final concernant l'objectif 2050. En effet, il serait arbitraire d'en préférer un aux autres.

Ces scénarios, appelés "*Illustrative Mitigation Pathways*" (IMPs), sont décrits dans le chapitre d'introduction du WGIII (cf. **[Chapter 1 AR6 WGIII, 173-174]**) :

Le concept de voie illustrative a été introduit dans le rapport spécial du GIEC sur le réchauffement climatique de 1,5 °C (ou SR1.5) pour mettre en évidence un sous-ensemble de scénarios quantitatifs, tirés d'un ensemble plus large de documents publiés, avec des caractéristiques spécifiques qui aideraient à représenter certaines des principales conclusions de l'évaluation en termes de différentes stratégies, ambitions et options disponibles pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris. Dans l'AR6, ces "*Illustrative Mitigation Pathways*" (IMPs) illustrent les thèmes clés des stratégies d'atténuation. Chacun comprend un récit et une illustration quantitative. Les récits décrivent qualitativement les principales caractéristiques de la voie ; les illustrations quantitatives sont sélectionnées dans la littérature sur les scénarios à long terme afin de représenter efficacement l'IMP sur le plan numérique. Ensemble, ces voies illustrent les développements futurs potentiels qui peuvent être façonnés par les choix de l'homme, notamment en tentant de répondre aux questions :

- Où nous mènent les politiques et les engagements actuels ?
- Que faut-il faire pour atteindre des objectifs de température spécifiques ?
- Quelles sont les conséquences de l'utilisation de différentes stratégies pour atteindre ces objectifs ? Quelles sont les conséquences des retards ?

- Comment pouvons nous modifier les pratiques actuelles en matière de développement afin d'accorder une plus grande priorité à la durabilité et aux objectifs du Millénaire pour le développement ?

Ainsi, pour expliquer précisément ce que sont et ne sont pas les IMPs, le GIEC indique dans le chapitre “*Introduction and Framing*” du WGIII ([**Chapter 1 AR6 WGIII, 175**]) qu'ils :

- Sont un ensemble de scénarios destinés à illustrer certains thèmes importants qui se retrouvent dans l'ensemble de l'évaluation du WGIII.
- Montrent que les résultats climatiques auxquels les individus et la société seront confrontés au cours du siècle à venir dépendent des choix **individuels** et **sociétaux**.
- Montrent qu'il existe de **multiples façons** d'atteindre avec succès l'Accord de Paris en matière de température à long terme.
- N'ont **pas** vocation à être **exhaustifs**. Ils n'ont pas pour but d'illustrer tous les thèmes possibles de ce rapport. Ils ne tentent pas, par exemple, d'illustrer l'éventail des voies socio-économiques alternatives sur lesquelles peuvent s'appuyer les efforts visant à mettre en œuvre l'Accord de Paris, ni de refléter les variations dans les voies potentielles de développement régional.
- N'explorent **pas** les questions relatives à la répartition des revenus ou à **la justice environnementale**, mais supposent implicitement que le lieu et la manière dont l'action est menée peuvent être séparés de la question de savoir qui paie, de manière à traiter ces questions de manière adéquate. Il s'agit essentiellement de voies d'évolution technologique et de changements de la demande qui reflètent les grandes tendances mondiales en matière de choix social.
- N'évaluent **pas directement** les questions de réalisme liées aux “**vecteurs et contraintes**”, et les quantifications utilisent, pour la plupart, des modèles fondés principalement sur les cadres de l'économie globale. En tant que tels, ils reflètent principalement les dimensions géophysique, économique et technologique de l'évaluation, mais peuvent être évalués par rapport à l'ensemble des critères de faisabilité.

Au total, 5 IMPs sont présentés dans l'AR6 : *GS*, *NEG*, *LD*, *REN* et *SP*. Leurs narratifs sont clairement définis dans ce même chapitre 1 ([**Chapter 1 AR6 WGIII, 175**]) :

- **IMP-GS** est une trajectoire de renforcement progressif des politiques actuelles jusqu'en 2030, suivie de réductions très rapides pour permettre de rester en deçà de +2°C.

- **IMP-NEG** est une trajectoire avec des réductions d'émissions plus importantes jusqu'en 2030, ce qui pourrait permettre d'atteindre les +1,5°C, mais seulement après un dépassement important, grâce à une utilisation extensive ultérieure de la CDR dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie pour parvenir à des émissions globales nettes négatives.

Les trois autres scénarios illustrent différentes caractéristiques avec des réductions d'émissions rapides à plus court terme, qui pourraient donner des résultats compatibles avec la fourchette de températures de l'Accord de Paris sans grand dépassement :

- **IMP-LD** est une stratégie qui s'appuie sur les possibilités de réduction de la demande (voir [24]).
- **IMP-REN** est une stratégie qui s'appuie sur une pénétration profonde et accélérée des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques et sur l'électrification.
- **IMP-SP** est une stratégie qui s'appuie sur une réorientation des voies de développement pour conduire à des réductions importantes des émissions et atteindre les objectifs de développement durable (voir [25]).

D'un point de vue plus technique, les caractéristiques de ces 5 scénarios sont illustrées dans le tableau 9 de la troisième annexe du WGIII ([Table 9, Annex III AR6 WGIII, 1878]) :

Table 9 | Storylines for the two reference pathways and five Illustrative Mitigation Pathways (IMPs) limiting warming to 1.5°C–2°C considered in the report.

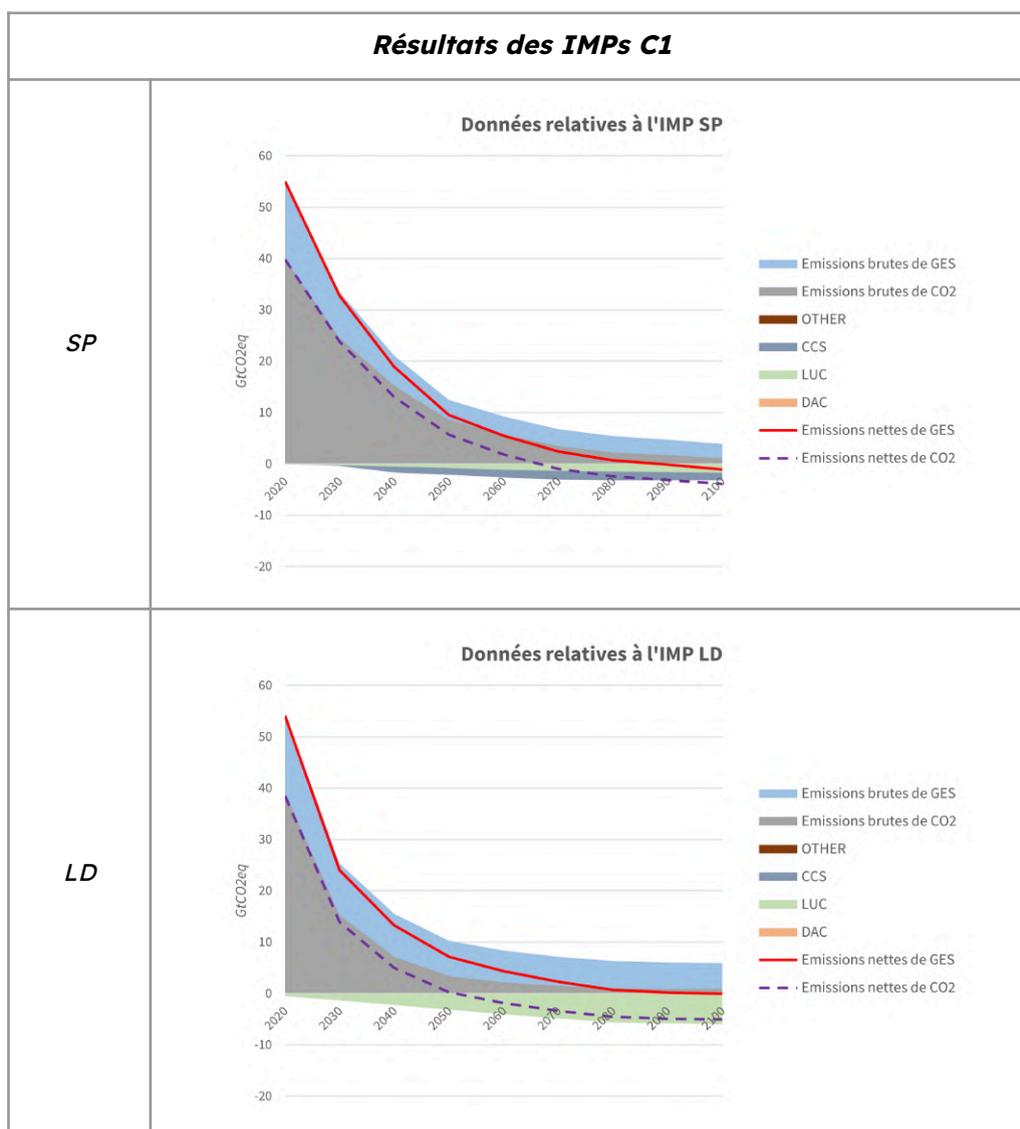
	General char.	Policy	Innovation	Energy	Land use, food biodiversity	Lifestyle	
CurPol	Continuation of current policies and trends	Implementation of current climate policies and neglect of stated goals and objectives; grey COVID-19 recovery	Business as usual; slow progress in low-carbon technologies	Fossil fuels remain important; lock-in	Further expansion of western diets; further slow expansion of agriculture area	Demand will continue to grow; no significant changes in current habits	
ModAct	NDCs in 2030 as announced in 2020, fragmented policy landscape; post-2030 action consistent with modest action until 2030	Strengthening of policies to implement NDCs; some further post-2030 strengthening and mixed COVID-19 recovery	Modest change compared to Cur-Pol	Mostly moving away from coal; growth of renewables; some lock-in in fossil investments	Afforestation/ reforestation policies as in NDCs	Modest change compared to Cur-Pol	
IMP	Neg	Mitigation in all sectors includes a heavy reliance on carbon dioxide removal that results in net negative global GHG emissions	Successful international climate policy regime with a focus on a long-term temperature goal	Further development of CDR options	Heavy reliance on CDR in power sector and industry; CDR used to compensate fossil fuel emissions	Afforestation/ reforestation, BECCS, increased competition for land	Not critical – some induced via price increases
	Ren	Greater emphasis on renewables: rapid deployment and technology development of renewables; electrification	Successful international climate policy regime; policies and financial incentives favouring renewable energy	Rapid further development of innovative electricity technologies and policy regimes	Renewable energy; electrification; sector coupling; storage or power-to-X technologies; better interconnections		Service provisioning and demand changes to better adapt to high renewable energy supply
	LD	Efficient resource use as well as shifts in consumption patterns globally, leading to low demand for resources, while ensuring a high level of services and satisfying basic needs		Social innovation; efficiency; across all sectors	Low demand for energy, while ensuring a high level of energy services and meeting energy needs; modal shifts in transport; rapid diffusion of best available technology in buildings and industry	Lower food and agricultural waste; less meat-intensive lifestyles	Service provisioning and demand changes; behavioural changes
	GS	less rapid introduction of mitigation measures followed by a subsequent gradual strengthening	Until 2030, primarily current NDCs are implemented and gradually strengthened moving gradually towards a strong, universal climate policy regime post-2030		Similar to IMP-Neg, but with some delay	Similar to IMP-Neg, but with some delay	
	SP	Shifting the global pathway towards sustainable development, including reduced inequality and deep GHG emissions reduction	SDG policies in addition to climate policy (poverty reduction; environmental protection)		low demand for energy, while ensuring a high level of energy services and meeting energy needs; renewable energy	Lower food and agricultural waste; less meat-intensive lifestyles; afforestation	Service provisioning and demand changes

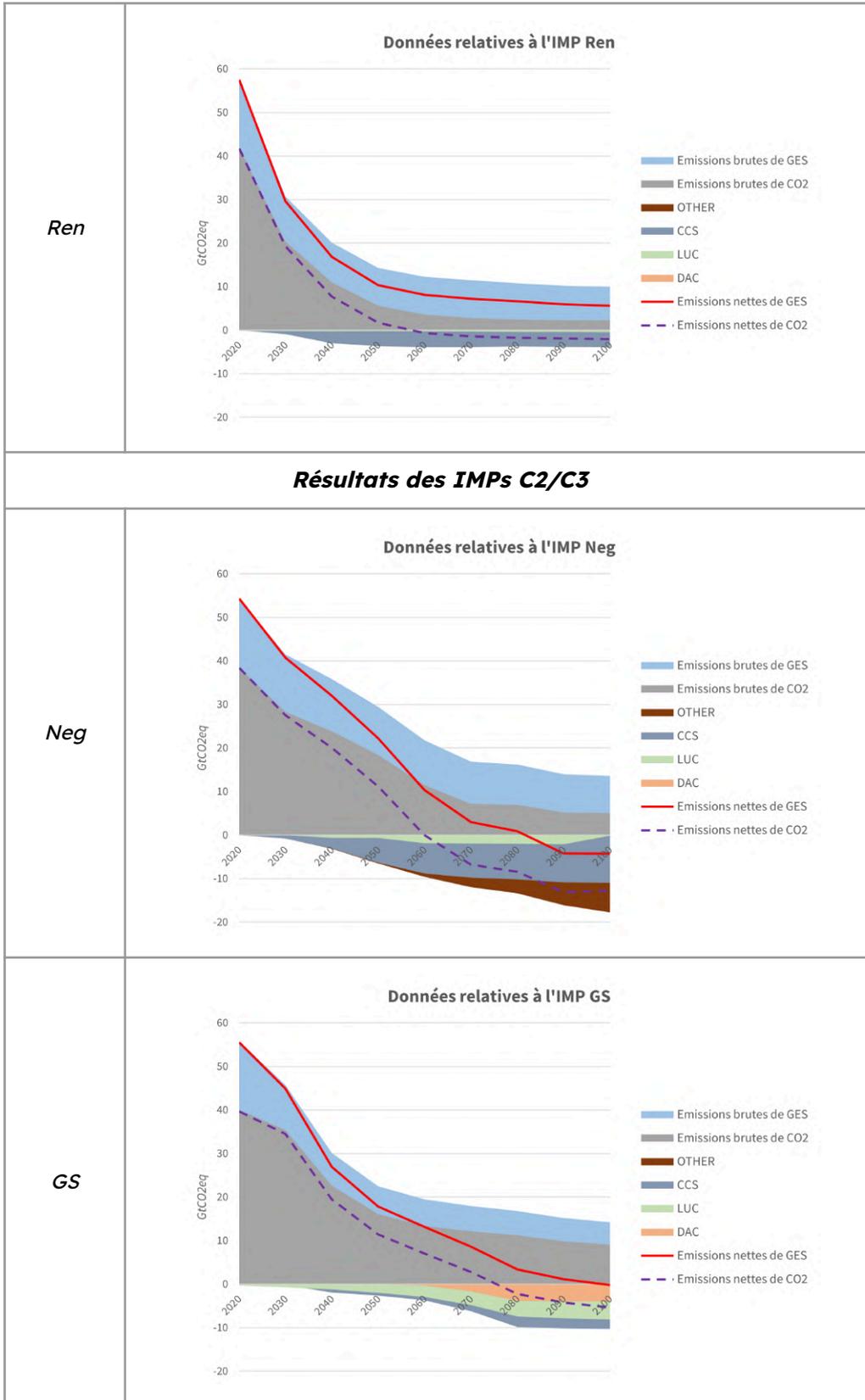
En somme, les IMPs sont des scénarios particulièrement intéressants qui nous permettent d'**explorer des récits précis** de transitions. Ces scénarios sont également mieux documentés dans l'AR6, ce qui facilite les analyses et offre une compréhension plus précise des enjeux connexes. Les résultats sont présentés et expliqués dans la partie suivante.

Premiers résultats sans faisabilité en 2050 sur les IMPs

À l'échelle mondiale

Dans un premier temps, nous déterminons les caractéristiques des IMPs avec l'équation (3) et sans incorporer d'analyse de faisabilité. Ces scénarios amènent à des transitions parfois bien différentes : réduction rapide des émissions ou captage important de carbone, développement d'un système énergétique peu émetteur ou limitation de la demande, etc. En voici les résultats agrégés :





Nous constatons que :

- Les trois IMPs C1 mettent en avant une **réduction rapide des émissions dès 2020**. Cette réduction est légèrement plus lente pour Neg et GS (les IMPs C2/C3) qui se reposent davantage sur des solutions d'absorption.
- Trois des cinq IMPs envisagent un déploiement accéléré de solutions d'élimination anthropique du CO₂ à partir de 2030. Les deux autres, SP et Ren, optent pour un rythme plus lent.
- Ren et LD choisissent une solution unique majoritaire de capture de carbone tandis que les autres les multiplient, comme l'illustrent GS et Neg.
- Les scénarios atteignent le "net zero" à des échéances variant de +/- 20 ans. Globalement, la neutralité carbone est atteinte autour de 2060, au plus tôt en 2050 pour LD. Notons tout de même que le plus important est le budget carbone consommé, et donc la forme de la courbe avant et après ces points d'étape. En ce sens, tous les IMPs C1 préconisent des réductions **fortes et rapides** pour limiter la quantité de budget consommé.
- Nous pouvons directement observer le lien entre les émissions cumulées de CO₂ et le réchauffement (avec une marge d'incertitude), que ce soit au cours du siècle ou en 2100. Pour cela, se référer au tableau SPM.2 du WGI ([**Table SPM.2 AR6 WGI, 29**]).

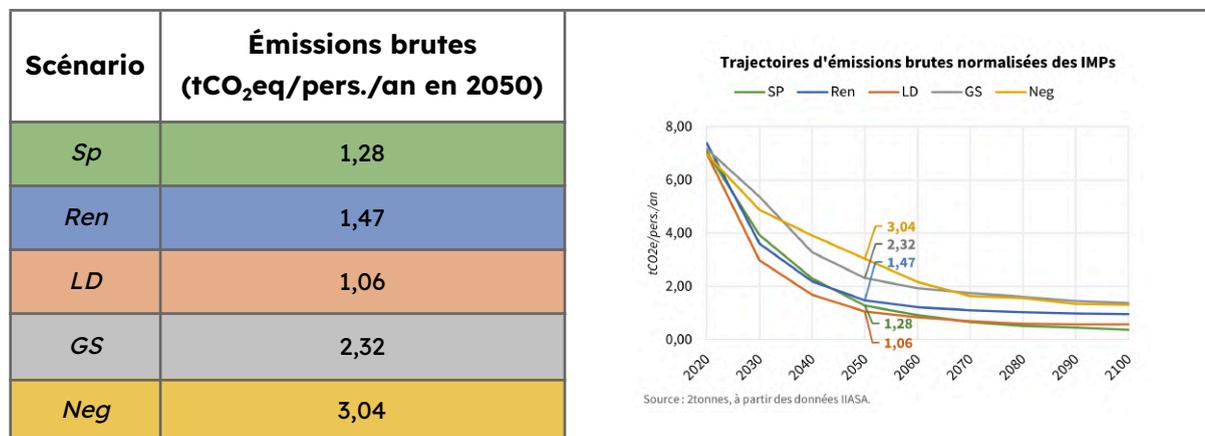
Table SPM.2 | Estimates of historical carbon dioxide (CO₂) emissions and remaining carbon budgets. Estimated remaining carbon budgets are calculated from the beginning of 2020 and extend until global net zero CO₂ emissions are reached. They refer to CO₂ emissions, while accounting for the global warming effect of non-CO₂ emissions. Global warming in this table refers to human-induced global surface temperature increase, which excludes the impact of natural variability on global temperatures in individual years. [Table 3.1, 5.5.1, 5.5.2, Box 5.2, Table 5.1, Table 5.7, Table 5.8, Table TS.3]

Global Warming Between 1850–1900 and 2010–2019 (°C)		Historical Cumulative CO ₂ Emissions from 1850 to 2019 (GtCO ₂)					
1.07 (0.8–1.3; likely range)		2390 (± 240; likely range)					
Approximate global warming relative to 1850–1900 until temperature limit (°C) ^a	Additional global warming relative to 2010–2019 until temperature limit (°C)	Estimated remaining carbon budgets from the beginning of 2020 (GtCO ₂)					Variations in reductions in non-CO ₂ emissions ^c
		Likelihood of limiting global warming to temperature limit ^b					
		17%	33%	50%	67%	83%	
1.5	0.43	900	650	500	400	300	Higher or lower reductions in accompanying non-CO ₂ emissions can increase or decrease the values on the left by 220 GtCO ₂ or more
1.7	0.63	1450	1050	850	700	550	
2.0	0.93	2300	1700	1350	1150	900	

^a Values at each 0.1°C increment of warming are available in Tables TS.3 and 5.8.
^b This likelihood is based on the uncertainty in transient climate response to cumulative CO₂ emissions (TCRE) and additional Earth system feedbacks and provides the probability that global warming will not exceed the temperature levels provided in the two left columns. Uncertainties related to historical warming (±550 GtCO₂) and non-CO₂ forcing and response (±220 GtCO₂) are partially addressed by the assessed uncertainty in TCRE, but uncertainties in recent emissions since 2015 (±20 GtCO₂) and the climate response after net zero CO₂ emissions are reached (±420 GtCO₂) are separate.
^c Remaining carbon budget estimates consider the warming from non-CO₂ drivers as implied by the scenarios assessed in SR1.5. The Working Group III Contribution to AR6 will assess mitigation of non-CO₂ emissions.

À l'échelle individuelle

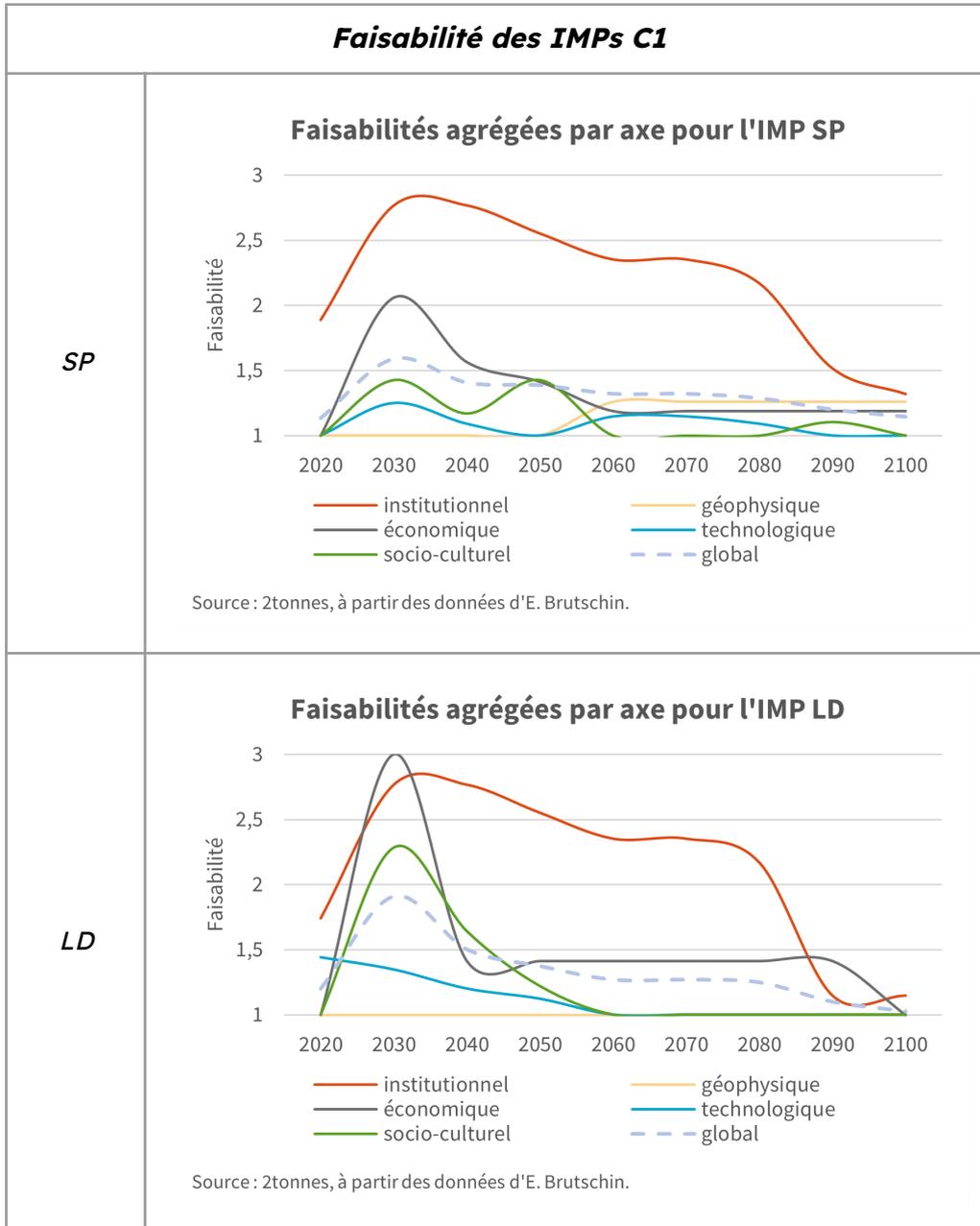
Afin d'obtenir les résultats à l'échelle individuelle, les émissions sont normalisées par an et par la population mondiale projetée (voir **équation (2)**). Dans ce contexte, les cinq IMPs passent par des émissions assez diverses en 2050 :

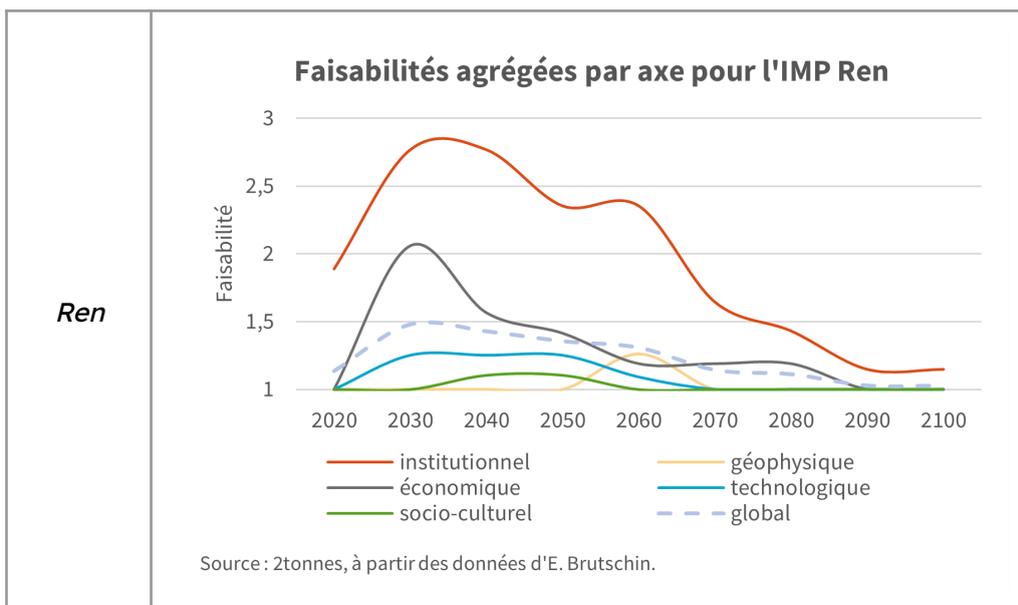


Ce passage met en lumière les différentes typologies de scénarios proposées par les IMPs, mettant notamment en opposition une réduction rapide des émissions par rapport à une réduction plus tardive qui nécessiterait un déploiement à grande échelle de mesures de capture (et qui n'est pas exempte des impacts qui vont avec). Cependant, certains aspects restent masqués, tels que le réchauffement induit par l'accumulation de CO₂, le moment où la neutralité carbone est atteinte, ou encore la proportion de CDR dans les émissions brutes.

Analyses de la faisabilité des IMPs (C1)

Voici les faisabilités obtenues pour les 3 IMPs C1, agrégées par axe et sur tout l'horizon temporel :





Ces représentations nous indiquent plusieurs éléments clés :

- Les transformations les plus ambitieuses doivent être effectuées **entre aujourd'hui et 2030**, quelle que soit la dimension.
- Comme mis en avant dans la partie « *Résultats de la faisabilité* », ce sont les axes "institutionnel" et "économique" qui présentent le **plus d'enjeux** concernant la réalisation de ces scénarios. L'axe "institutionnel" constitue le principal obstacle aux transformations nécessaires pour atteindre une société à 1,5°C.
- Les niveaux de transformations restent globalement **réalistes** et **accessibles**, ce qui appuie la cohérence d'un objectif de réchauffement de type C1 (+1,5°C (>50%) sans ou avec faible dépassement).
- LD est le scénario suscitant le plus haut niveau de préoccupation. Ceci n'est pas surprenant compte tenu de la nature et de la rapidité des transformations requises par ce scénario.

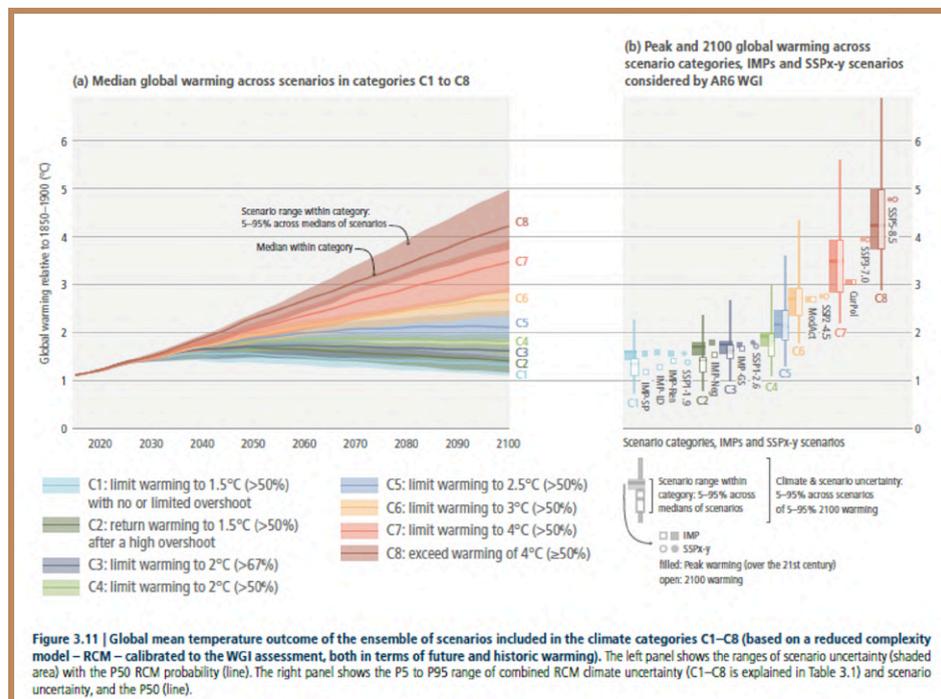
Compléments sur l'analyse des IMPs

En complément au travail précédemment exposé, nous pouvons noter quelques points sur le lien budget carbone / réchauffement :

- Le budget carbone **net** consommé peut être estimé à partir de la variable "AR6 climate diagnostics|Infilled|Emissions|CO2" et de la méthode des trapèzes pour le calcul d'aire sur des pas de 10 ans. Nos résultats sont cohérents avec les budgets fournis dans la base de données de l'IIASA.

IMP	CO ₂ cumulé IIASA (2020-2100)	CO ₂ cumulé estimé (2020-2100)
SP	563,8	557
Ren	439,5	427
LD	227,4	210
GS	870,6	858
Neg	435,8	432

- La quantité cumulée de gaz à effet de serre n'est pas un indicateur pertinent pour étudier la valeur du réchauffement. En effet, la demi-vie de ces gaz varie considérablement, ce qui signifie que le cumul estimé à partir d'une intégrale diffère de celui réellement présent dans l'atmosphère. Par exemple, pour du méthane émis en 2020, dont la durée de vie estimée est d'environ 10 ans, sa contribution au réchauffement est réduite de moitié à la fin de cette période.
- Il n'est pas possible de lier directement les budgets carbone avec les réchauffements en 2100. D'autres éléments jouent un rôle non négligeable dans l'estimation (notamment les émissions des autres gaz à effet de serre). Pour avoir ce détail, se référer à la figure 3.11 du chapitre 3 du WGIII ([Figure 3.11, Chapter 3 AR6 WGIII, 317]) :



Bibliographie

[1] **Wagner, T.** (2023, 1er février). *Objectif 2 tonnes : vrai défi ou mauvaise cible ?* bonpote.

https://bonpote.com/objectif-2-tonnes-vrai-defi-ou-mauvaise-cible/#D'ou_vient_le_chiffre_2_tonnes (consulté le 15/02/2024).

[2] **Laugier, F.** (2021, 21 mai). *Objectif 2tonnes pour le climat : son origine, sa signification.* Medium.

<https://francois-90268.medium.com/pourquoi-2tonnes-1-3-c7ec100f97bd> (consulté le 15/02/2024).

[3] **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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. doi.org/10.1017/9781009157940.

[4] Edward Byers, Volker Krey, Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Roberto Schaeffer, Jarmo Kikstra, Robin Lamboll, Zebedee Nicholls, Marit Sanstad, Chris Smith, Kaj-Ivar van der Wijst, Alaa Al Khourdajie, Franck Lecocq, Joana Portugal-Pereira, Yamina Saheb, Anders Strømman, Harald Winkler, Cornelia Auer, Elina Brutschin, Matthew Gidden, Philip Hackstock, Mathijs Harmsen, Daniel Huppmann, Peter Kolp, Claire Lepault, Jared Lewis, Giacomo Marangoni, Eduardo Müller-Casseres, Ragnhild Skeie, Michaela Werning, Katherine Calvin, Piers Forster, Céline Guivarch, Tomoko Hasegawa, Malte Meinshausen, Glen Peters, Joeri Rogelj, Bjorn Samset, Julia Steinberger, Massimo Tavoni, Detlef van Vuuren. *AR6 Scenarios Database hosted by IIASA*. International Institute for Applied Systems Analysis, 2022. doi: [10.5281/zenodo.5886911](https://doi.org/10.5281/zenodo.5886911) | url: data.ece.iiasa.ac.at/ar6/

[5] Peters, G.P., Al Khourdajie, A., Sognaes, I. et al. AR6 scenarios database: an assessment of current practices and future recommendations. *npj Clim. Action* 2, 31 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00050-9>

[6] **United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division** (2022). *World Population Prospects 2022*, Online Edition. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/> (consulté le 15/02/2024).

[7] **Smith, C.** (2021, 28 septembre). *The role ‘emulator’ models play in climate change projections*. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-the-role-emulator-models-play-in-climate-change-projections/> (consulté le 19/03/2024).

[8] **United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division** (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (consulté le 15/02/2024).

[9] **United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division** (2022). *World Population Prospects 2022: Methodology of the United Nations population estimates and projections*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 4. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2022_Methodology.pdf (consulté le 15/02/2024).

[10] **International Institute for Applied Systems Analysis** (2024, janvier). *SSP Scenario Explorer*. <https://data.ece.iiasa.ac.at/ssp/#/workspaceshttps://data.ece.iiasa.ac.at/ssp/#/workspaces> (consulté le 19/03/2024).

[11] Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 12, 2015, T.I.A.S. No. 16-1104.

[12] **Schleussner, C. F., Nauels, A., Klönne, U. & Hare B.** (2022, 13 mai). *Understanding the Paris Agreement’s Long Term Temperature Goal*. Climate Analytics. <https://climateanalytics.org/comment/understanding-the-paris-agreements-long-term-temperature-goal> (consulté le 15/02/2024).

[13] **Rogelj, J. & Schleussner, C. F.** (2017, 10 octobre). *Guest post: Interpreting the Paris Agreement’s 1.5C temperature limit*. CarbonBrief. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-interpreting-paris-agreements-1-point-5-c-temperature-limit/> (consulté le 15/02/2024).

[14] **Ganti, G., Schleussner, C.F., Fyson, C., Hare, B.** (2022, 25 mai). *New pathways to 1.5°C: interpreting the IPCC’s Working Group III scenarios in the context of the Paris Agreement*. <https://climateanalytics.org/comment/new-pathways-to-15c-interpreting-the-ipccs-working-group-iii-scenarios-in-the-context-of-the-paris-agreement> (consulté le 19/03/2024).

[15] Brutschin, E., et al., 2021: A multidimensional feasibility evaluation of low-carbon scenarios. *Environ. Res. Lett.*, 16(6), 64069, doi: doi.org/10.1088/1748-9326/abf0ce

[16] Brutschin, E., et al. (2021). *A multidimensional feasibility evaluation of low-carbon scenarios : Supplementary Material*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abf0ce/data> (consulté le 19/03/2024).

[17] International Institute for Applied Systems Analysis (2022, 27 septembre). *Scenarios Forum - Session 48 [Vidéo]*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=kgMVLzOfQlg> (consulté le 15/02/2024).

[18] IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. *Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis*, 2018. doi: <https://doi.org/10.22022/SR15/08-2018.15429> | url: <https://data.ece.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer> (consulté le 15/02/2024).

[19] Robiou du Pont, Y. et al. Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. *Nature Climate Change* 7, (2017), available at: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3186>.

[20] Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (2020, mars). *Stratégie nationale bas-carbone*. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc#:~:text=Ce%20plan%20d'action%20d%C3%A9cline,n%C3%A9cessaires%20pour%20adapter%2C%20d'ici> (consulté le 19/03/2024).

[21] Service des données et études statistiques (2023, octobre). *La France face aux neuf limites planétaires*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/pdf/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires.pdf> (consulté le 19/03/2024).

[22] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (2024, mars). *Feuilleton « Évaluation des empreintes carbone et matières »*. https://librairie.ademe.fr/cadic/7859/feuilleton-empreintes-transitions2050_ademe.pdf (consulté le 19/03/2024).

[23] Laugier, F. (2023). *Se concentrer sur le climat est-il contreproductif ?* 2tonnes. <https://www.2tonnes.org/post/l-approche-climat-est-elle-contreproductive#:~:text=Mais%20se%20concentrer%20uniquement%20sur,plus%20large%20que%20le%20climat> (consulté le 20/03/2024).

[24] Grubler, A., Wilson, C., Bento, N. et al. *A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies*. *Nat Energy* 3, 515–527 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>

[25] Soergel, B., Kriegler, E., Weindl, I. et al. *A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda*. *Nat. Clim. Chang.* 11, 656–664 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01098-3>

[26] IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).

[27] IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:[10.1017/9781009325844](https://doi.org/10.1017/9781009325844).

[28] IPCC, 2022: *Summary for Policymakers* [P.R. Shukla, J. Skea, A. Reisinger, R. Slade, R. Fradera, M. Pathak, A. Al Khourdajie, M. Belkacemi, R. van Diemen, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, D. McCollum, S. Some, P. Vyas, (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: doi.org/10.1017/9781009157926.001

[29] Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, I. Adelekan, C. Adler, R. Adrian, P. Aldunce, E. Ali, B. Bednar- Friedl, R.A. Begum, R. Bezner Kerr, R. Biesbroek, J. Birkmann, K. Bowen, M.A. Caretta, J. Carnicer, E. Castellanos, T.S. Cheong, W. Chow, G. Cissé, S. Clayton, A. Constable, S.R. Cooley, M.J. Costello, M. Craig, W. Cramer, R. Dawson, D. Dodman, J. Efitre, M. Garschagen, E.A. Gilmore, B.C. Glavovic, D. Gutzler, M. Haasnoot, S. Harper, T. Hasegawa, B. Hayward, J.A. Hicke, Y. Hirabayashi, C. Huang, K. Kalaba, W. Kiessling, A. Kitoh, R. Lasco, J. Lawrence, M.F. Lemos, R. Lempert, C. Lennard, D. Ley, T. Lissner, Q. Liu, E. Liwenga, S. Lluch-Cota, S. Löschke, S. Lucatello, Y. Luo, B. Mackey, K. Mintenbeck, A. Mirzabaev, V. Möller, M. Moncassim Vale, M.D. Morecroft, L. Mortsch, A. Mukherji, T. Mustonen, M. Mycoo, J. Nalau, M. New, A. Okem, J.P. Ometto, B. O'Neill, R. Pandey, C. Parmesan, M. Pelling, P.F. Pinho,

J. Pinnegar, E.S. Poloczanska, A. Prakash, B. Preston, M.-F. Racault, D. Reckien, A. Revi, S.K. Rose, E.L.F. Schipper, D.N. Schmidt, D. Schoeman, R. Shaw, N.P. Simpson, C. Singh, W. Solecki, L. Stringer, E. Totin, C.H. Trisos, Y. Trisurat, M. van Aalst, D. Viner, M. Wairiu, R. Warren, P. Wester, D. Wrathall, and Z. Zaiton Ibrahim, 2022: Technical Summary. [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37-118, doi:[10.1017/9781009325844.002](https://doi.org/10.1017/9781009325844.002).

[30] IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: [10.1017/9781009157926](https://doi.org/10.1017/9781009157926).

Remerciements

Nous exprimons notre gratitude aux relecteurs et relectrices pour leur aide précieuse tout au long de la rédaction de cette note, tant sur son fond que sur sa forme. Nous tenons particulièrement à remercier :

- **Basset Auguste**
- **de la Grandière Bathylle**
- **Ducreux Eloïse**
- **Fontane Jérôme**
- **Giaccone Loïc**
- **Meyer Rodolphe**
- **Moreira Laura**
- **Muesser Antonin**
- **Ravillion Alette**