

3

Les impacts du changement climatique et leurs effets en cascade : conséquences en termes de pertes et de dommages

Ce chapitre expose les pertes et les dommages physiques et socio-économiques observés et anticipés, en soulignant l'interpénétration des risques dans les sociétés. Son objectif est de faire la lumière sur les effets en cascade potentiels des impacts du changement climatique et de montrer en quoi ces effets rendent l'évaluation des risques plus complexe. La nature et l'ampleur potentielle des risques liés au climat sont illustrées par une analyse des impacts de l'élévation du niveau de la mer dans les petits États insulaires en développement ; de l'impact potentiel des phénomènes extrêmes et de leur attribution au changement climatique anthropique ; et des conséquences du franchissement d'un point de basculement pour la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC).

En bref

Les aléas liés au climat sont nombreux et s'intensifient rapidement, entraînant des effets en cascade sur tous les secteurs et par-delà les frontières des pays.

Ce chapitre examine trois grandes catégories d'aléas liés au climat : i) les **phénomènes météorologiques extrêmes**, et notamment la fréquence et la gravité croissantes des canicules, des sécheresses, des précipitations extrêmes et des inondations ; ii) les **phénomènes à manifestation lente**, y compris l'élévation du niveau de la mer, l'acidification des océans, le recul des glaciers, l'appauvrissement de la biodiversité et la désertification ; et iii) les **points de basculement**, tels que l'effondrement de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC) et le dépérissement de la forêt tropicale amazonienne.

Les systèmes naturels, sociaux et économiques de la planète étant interconnectés et interdépendants, les impacts du changement climatique peuvent se propager dans le monde par différents canaux, par exemple les échanges commerciaux, les flux financiers et les réseaux d'approvisionnement. Ces effets en cascade du changement climatique, qui se propagent à travers les secteurs et les frontières, posent des difficultés particulières pour l'évaluation des risques.

Ce chapitre présente et analyse sous un angle novateur trois cas spécifiques d'aléas liés au climat, qui relèvent de chacune des trois grandes catégories indiquées ci-avant. Ces aléas font planer de graves menaces sur les systèmes humains et naturels et engendrent déjà des pertes et des dommages s'agissant des phénomènes extrêmes et des phénomènes à manifestation lente. La gravité de ces aléas, décrite succinctement dans les paragraphes qui suivent, devrait s'intensifier à l'avenir.

Élévation du niveau de la mer dans les petits États insulaires en développement

- Les petits États insulaires en développement (PEID) désignent un groupe hétérogène de territoires insulaires, situés pour la plupart dans les Caraïbes, l'océan Pacifique et l'océan Indien. Aussi diversifiés soient-ils, tous les PEID sont vulnérables au changement climatique, et en particulier à l'élévation du niveau de la mer, pour quatre raisons : i) les zones les plus habitables des PEID sont les zones côtières de faible altitude ; ii) les PEID sont particulièrement touchés par les catastrophes d'origine météorologique ; iii) les PEID se caractérisent par des économies fragiles et une gamme limitée de ressources naturelles ; et iv) beaucoup d'entre eux sont éloignés des marchés.
- Les impacts, pertes et dommages occasionnés aux PEID par la montée du niveau de la mer sont multiples : inondations des côtes ; érosion des côtes et disparition de terres ; disparition d'écosystèmes, qui accentue les inondations et l'érosion des côtes ; et disparition de ressources en eau douce.

Quantification des impacts dommageables du changement climatique et attribution des phénomènes extrêmes

- Évaluer et quantifier les impacts réels du changement climatique au moment où ils se manifestent représente un défi tenace pour les scientifiques. La « science de l'attribution » désigne une méthodologie « ascendante » qui vise à démêler les différents facteurs physiques à l'origine de ces catastrophes aux coûts élevés. Elle permet également de quantifier l'effet

amplificateur du changement climatique sur les phénomènes météorologiques extrêmes individuels.

- De nouvelles analyses montrent que les épisodes de chaleur extrême deviennent plus fréquents et plus graves, et ce plus rapidement de plusieurs ordres de grandeur que tout autre type de phénomène météorologique extrême. Elles montrent également que les océans tropicaux sont, de loin, les zones qui enregistrent les changements relatifs les plus rapides des températures élevées extrêmes. Viennent ensuite, en termes de rapidité des changements, les régions arides de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, puis les autres régions terrestres tropicales. En outre, le changement relatif moyen de la chaleur extrême auquel est exposée une personne dans un pays moins avancé (PMA) est supérieur de 50 % à la hausse moyenne mondiale. En revanche, le changement relatif de la chaleur extrême dans les pays membres de l'OCDE est plus lent que le changement moyen à l'échelle mondiale.
- La gravité d'un aléa climatique est une approximation imparfaite de la gravité des impacts, la vulnérabilité et l'exposition étant également des déterminants importants de l'ampleur des pertes et des dommages. Ainsi, des aléas météorologiques relativement courants ou fréquents peuvent-ils causer des dégâts considérables lorsqu'ils frappent des populations vulnérables et exposées. C'est dans les pays pauvres qu'il existe le plus de possibilités de réduire la vulnérabilité.
- Entre autres nombreux avantages, la science de l'attribution offre une méthode pour établir les liens de causalité entre les phénomènes météorologiques extrêmes récents et le changement climatique. Cependant, elle donne rarement des résultats concluants en ce qui concerne les phénomènes météorologiques extrêmes qui frappent les pays à faible revenu. Les obstacles à l'amélioration qualitative et quantitative des études d'attribution des phénomènes extrêmes dans ces pays sont désormais connus. Ils comprennent notamment des relevés d'observation de piètre qualité, le caractère inadapté des modèles climatiques de faible résolution et les différences des mécanismes de notification des impacts des phénomènes extrêmes.
- Il est urgent de dresser un inventaire quantitatif des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes dus au changement climatique anthropique. Ce chapitre propose un cadre préliminaire qui pourrait guider l'inventaire des impacts des conditions météorologiques extrêmes liées au changement climatique.

Points de basculement

- L'affaiblissement brutal ou l'effondrement de l'AMOC entraînerait un virage climatique qui serait lourd de conséquences sur le plan régional, voire mondial. Le continent européen deviendrait plus froid et plus sec, ce qui réduirait la productivité agricole et rendrait la plupart des terres impropres à la culture. Il est probable que les forêts boréales du nord de l'Europe et de l'Asie dépériraient, principalement à cause de l'assèchement de ces régions. À l'inverse, les forêts boréales d'Amérique du Nord pourraient tirer profit de l'augmentation des précipitations et d'étés plus frais.
- La réorganisation du système climatique induite par l'effondrement de l'AMOC aurait une incidence sur les écosystèmes ainsi que sur la santé humaine, les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau et la croissance économique à l'échelle de la planète. Les modifications de la température à la surface de la mer et des régimes pluviométriques dans l'Atlantique tropical affecteraient la stabilité de l'Amazonie. Le climat futur de la région amazonienne après un effondrement de l'AMOC ressemblerait au climat des régions africaines où la savane et les prairies constituent le biome dominant, impliquant la disparition de la forêt tropicale. Même sans effondrement de l'AMOC, l'Afrique du Nord devrait enregistrer la plus forte baisse de précipitations de la planète sous l'effet du changement

climatique. L'effondrement de l'AMOC perturberait la mousson en Afrique de l'Ouest, réduisant un peu plus les précipitations.

- L'effondrement de l'AMOC, analysé de façon approfondie dans ce rapport, n'est que l'un des nombreux éléments du système terrestre susceptibles de présenter un point de basculement. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime que l'effondrement de l'AMOC au cours de ce siècle est « très improbable », ce qui représente une probabilité de 0 à 10 %. Toutefois, une telle éventualité ne peut être totalement exclue. D'après des études récentes, l'AMOC a atteint sa plus faible intensité depuis un millénaire, et son affaiblissement va sans doute se poursuivre. Compte tenu de l'ampleur potentielle de leurs effets en cascade, ces événements à impact élevé et à probabilité faible doivent être pris en considération dans les évaluations des risques, comme le recommande le GIEC.
- Le changement climatique continue de remodeler la structure socio-économique mondiale. Cela risque de retentir sur les progrès vers la réalisation des Objectifs de développement durable, de perturber le commerce mondial, d'amplifier les conflits sociaux et les inégalités et de compromettre la sécurité humaine. Conjuguées à une réduction rapide et marquée des émissions de gaz à effet de serre, la mesure et la surveillance des principaux éléments basculants, tels que l'AMOC, donneront aux pays plus de temps pour élaborer des stratégies de gestion des conséquences de ces changements abrupts des systèmes climatiques, fondées notamment sur des mesures d'adaptation et de prévention.

3.1. Introduction

Les pertes et dommages sont la résultante de processus physiques et socio-économiques complexes et interdépendants, qui sont à l'œuvre depuis de nombreuses décennies, voire depuis des siècles. Comme on l'a vu dans le chapitre 1, il est utile d'appréhender les risques climatiques en termes d'aléas liés au climat d'une intensité donnée, d'**exposition** et de **vulnérabilité** à ces aléas (GIEC, 2014^[1]). Cela signifie que le risque dépend de l'ampleur du changement climatique anthropique à l'échelle mondiale. Ce changement climatique anthropique détermine la nature et l'intensité des aléas liés au climat auxquels un pays est confronté, conjointement à la situation géographique du pays. Le risque dépend aussi de l'exposition des systèmes humains et naturels à l'aléa considéré. Enfin, il dépend de la vulnérabilité du pays aux différents aléas.

Les interactions entre ces trois éléments, qui agissent sur des systèmes interconnectés, peuvent déclencher une cascade de risques majeurs dans les différents secteurs et régions. Les ondes de tempête, les inondations côtières ou la montée du niveau de la mer, par exemple, peuvent perturber les moyens de subsistance. Les risques systémiques dus aux phénomènes météorologiques extrêmes peuvent également conduire à l'effondrement des réseaux d'infrastructures et des services essentiels ; à des risques d'insécurité alimentaire et hydrique ; et à la disparition de moyens de subsistance et de revenus ruraux, en particulier pour les populations les plus pauvres (GIEC, 2014^[2]).

Le chapitre 1 a montré, entre autres, que le changement climatique entraîne des modifications importantes dans les systèmes naturels et humains sur tous les continents et à travers les océans. Le chapitre 2 a examiné en détail les différents types et niveaux d'incertitude associés aux trois composantes du risque, à savoir l'aléa, l'exposition et la vulnérabilité. Il faut tenir compte de ces incertitudes pour formuler des approches permettant de réduire et gérer les risques de pertes et de dommages dus au changement climatique. Le chapitre 3 propose une analyse approfondie de trois types d'aléa liés au climat et de leurs impacts associés. La section 3.2 donne une description succincte des aléas liés au climat, notamment les phénomènes météorologiques extrêmes, les phénomènes qui se manifestent lentement et les points de

basculement. La section 3.3 examine la possibilité que des impacts se diffusent en cascade entre les secteurs et entre les régions. Le chapitre se penche ensuite sur trois types particuliers d'aléas liés au climat susceptibles d'engendrer des pertes et des dommages. Il s'intéresse tout d'abord à l'élévation du niveau de la mer, en se concentrant plus particulièrement sur la situation des petits États insulaires en développement (PEID) (section 3.4). Il traite ensuite les phénomènes extrêmes et leur attribution au changement climatique anthropique, en mettant l'accent sur les canicules (section 3.5). Enfin, il analyse les conséquences des points de basculement climatiques en termes de pertes et de dommages (section 3.6). Il examine à la loupe un point de basculement spécifique, l'affaiblissement de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC), qui opère un transfert de chaleur de l'équateur vers les hautes latitudes de l'Atlantique. Ces trois types d'aléa font planer de graves menaces sur les systèmes humains et naturels. Ils provoquent déjà des pertes et des dommages, et leur gravité devrait augmenter à l'avenir.

3.2. Impacts du changement climatique : des aléas liés au climat aux pertes économiques

3.2.1. Aléas liés au climat

L'accumulation de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère accentuera le réchauffement et entraînera des changements durables dans de nombreuses composantes du système terrestre, amplifiant les risques actuels et créant de nouveaux risques. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est la source la plus autorisée en ce qui concerne les projections des aléas liés au climat induits par le changement climatique. Il prévoit avec certitude que les impacts du changement climatique augmenteront en gravité, en fréquence et en magnitude à mesure que le réchauffement de la planète se poursuivra, et que ces impacts pourraient devenir irréversibles. Ces aléas liés au climat sont divers, se produisent à différentes échelles temporelles et se manifestent à des vitesses différentes (GIEC, 2014^[2]). L'article 8 de l'Accord de Paris reconnaît ces échelles temporelles distinctes et leurs conséquences potentiellement différentes en termes de pertes et de dommages. Il stipule que « les Parties reconnaissent la nécessité d'éviter les pertes et préjudices liés aux effets néfastes des changements climatiques, notamment les phénomènes météorologiques extrêmes et les phénomènes qui se manifestent lentement, de les réduire au minimum et d'y remédier » (Accord de Paris, 2015^[3]).

Outre les phénomènes météorologiques extrêmes et les phénomènes qui se manifestent lentement, le changement climatique est également susceptible de faire basculer certaines composantes du système terrestre au-delà de seuils critiques – les « points de basculement climatiques ». Il en résulterait des états climatiques qualitativement nouveaux, qui pourraient occasionner de lourdes retombées sur les systèmes humains et écologiques (Lenton et al., 2008^[4]). S'appuyant sur un ensemble de définitions acceptées par les Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ou fournies par le GIEC et le corpus de travaux scientifiques sur le climat, ce chapitre examine trois grandes catégories d'aléas liés au climat pour caractériser les impacts du changement climatique :

- **Phénomènes météorologiques extrêmes** : au sens du GIEC, un phénomène météorologique extrême est « un phénomène rare en un endroit et à un moment de l'année particuliers. [...] Par définition, les caractéristiques de conditions météorologiques extrêmes peuvent, dans l'absolu, varier d'un lieu à un autre » (GIEC, 2018^[5]). Un phénomène météorologique extrême se manifeste normalement sur une durée comprise entre moins d'un jour et quelques semaines¹ (Seneviratne et al., 2012^[6]). Les phénomènes météorologiques extrêmes comprennent la fréquence et la gravité accrues des canicules, des sécheresses, des cyclones, des précipitations extrêmes, des niveaux marins extrêmes (ondes de tempête, vagues ; Encadré 3.2), les inondations (provoquées par les précipitations extrêmes, les niveaux marins extrêmes et la fonte des glaciers) et les feux de

végétation (qui résultent d'une conjonction de facteurs tels que la chaleur, l'absence de pluie et le vent), entre autres exemples.

- **Phénomènes qui se manifestent lentement** : au moment de la rédaction du présent document, le GIEC n'a pas donné de définition officielle des phénomènes qui se manifestent lentement. Schäfer et al. (2021^[7]) les définissent comme « des phénomènes provoqués ou intensifiés par le changement climatique anthropique, qui se produisent sur de longues périodes – généralement plusieurs décennies, voire plusieurs siècles – sans point de départ ou de fin clairement identifié ». L'Accord de Cancún adopté par la CCNUCC reconnaît comme phénomènes qui se manifestent lentement l'élévation du niveau de la mer, la hausse des températures, l'acidification des océans, le recul des glaciers et ses effets connexes, la salinisation, la dégradation des terres et des forêts, le déclin de la biodiversité et la désertification (CCNUCC, 2010^[8]).
- **Points de basculement** : au sens du GIEC, un point de basculement est un « degré de changement des propriétés d'un système au-delà duquel le système en question se réorganise, souvent de façon abrupte, et ne retrouve pas son état initial même si les facteurs à l'origine du changement sont éliminés. En ce qui concerne le système climatique, la notion de point de basculement fait référence à un seuil critique au-delà duquel le climat mondial ou un climat régional passe d'un état stable à un autre état stable. » Le GIEC a introduit la notion de points de basculement climatique il y a une vingtaine d'années, alors qu'ils n'étaient considérés comme probables que dans l'hypothèse de taux et d'amplitudes de réchauffement élevés, atteignant entre 5 et 6 °C d'ici 2100 (GIEC, 2001^[9]). Des rapports plus récents du GIEC reconnaissent qu'il existe un risque de franchissement des points de basculement à des niveaux de réchauffement beaucoup plus faibles (GIEC, 2018^[10] ; GIEC, 2019^[11]). Les éléments basculants du système climatique comprennent, entre autres, la disparition de l'inlandsis de l'Antarctique occidental, l'effondrement de l'AMOC, l'extinction des récifs coralliens et le dépérissement de la forêt tropicale amazonienne.

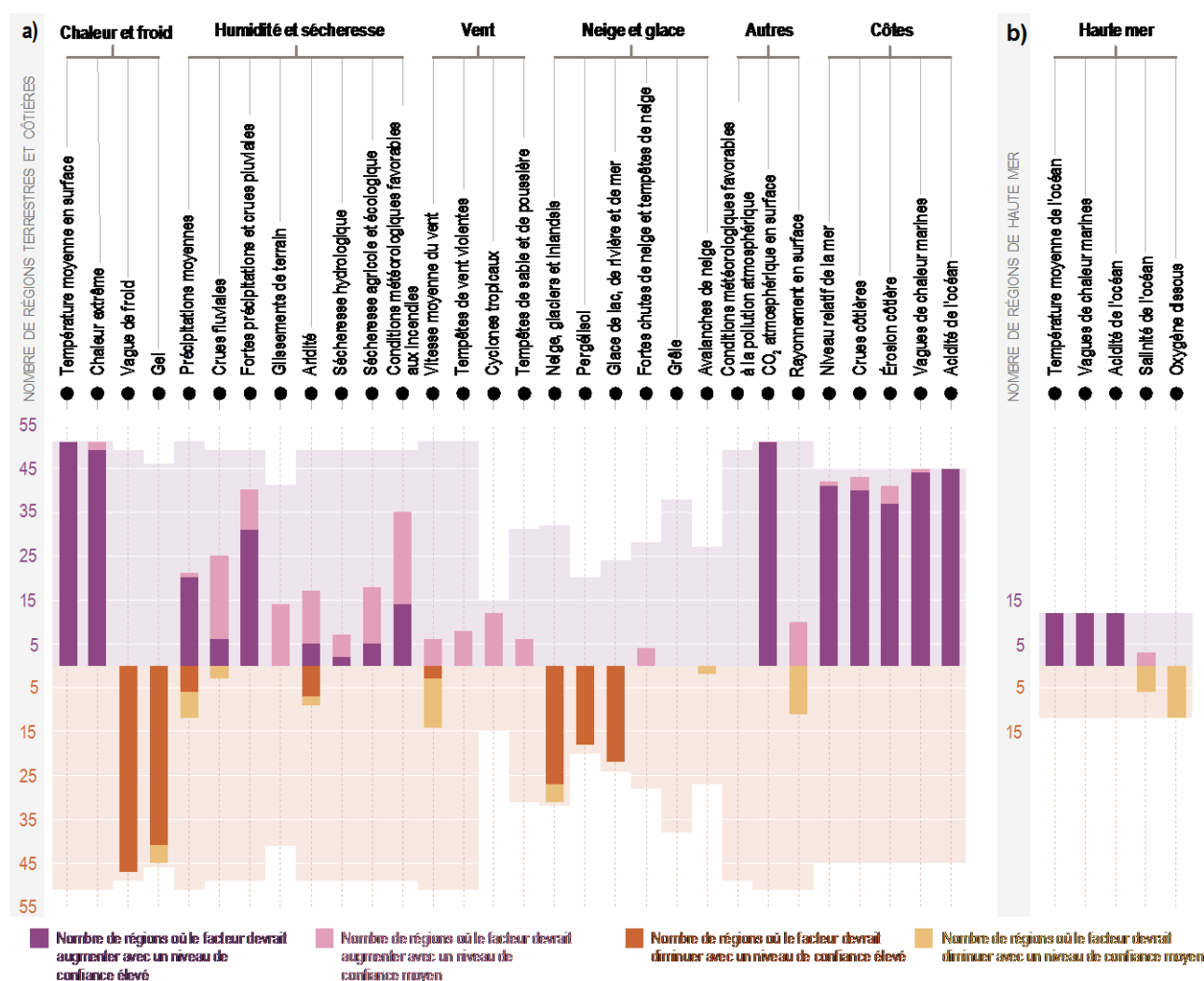
Les sous-sections qui suivent analysent brièvement les études les plus récentes consacrées à ces trois phénomènes distincts. Lorsque c'est possible, elles évaluent la probabilité d'une influence humaine sur les changements observés dans le passé (par exemple, l'apparition de différents types de phénomènes météorologiques extrêmes) ou la probabilité de franchissement d'un point de basculement dans différents scénarios de réchauffement futur. L'évaluation de ces probabilités repose sur l'échelle et les termes de probabilité bien établis du GIEC, décrits au chapitre 2. Ce chapitre montre également que les stratégies de gestion des risques doivent faire en sorte que le risque associé à un phénomène déterminé ne soit ni surestimé ni sous-estimé (Shepherd, 2019^[12]). Le changement climatique se résume à un problème de gestion des risques pour les autorités publiques dans le contexte national (voir également chapitre 2). Pour Sutton (2019^[13]), par exemple, il n'est pas judicieux que la climatologie se concentre sur les probabilités, car probabilité et risque sont deux choses différentes. Par conséquent, les probabilités associées aux changements prévus qui sont présentées dans ce chapitre doivent être examinées sous l'angle de l'élaboration des politiques et dans un contexte de formulation de stratégies de gestion des risques.

En outre, le risque associé à un phénomène déterminé ne dépend pas que de sa probabilité. D'autres facteurs importants entrent en jeu : le lieu et le moment où le risque se manifestera, les niveaux de vulnérabilité et d'exposition des systèmes touchés, ainsi que la gravité de l'aléa lui-même. Les grandes catastrophes ponctuelles peuvent ne se produire qu'une fois en plusieurs années. D'un autre côté, des phénomènes dangereux de moindre intensité peuvent se produire à une fréquence beaucoup plus élevée. Or, l'impact cumulé de ces phénomènes à fréquence élevée et à faible impact peut être tout aussi, voire plus dévastateur que l'impact d'une catastrophe de grande ampleur (voir chapitre 5 pour un exposé sur les conséquences des impacts récurrents pour la viabilité budgétaire des pays).

Phénomènes météorologiques extrêmes

Le changement climatique entraîne des modifications de la fréquence, de l'intensité, de l'étendue spatiale, de la durée et de l'occurrence dans le temps des phénomènes météorologiques extrêmes, pouvant aboutir à des extrêmes sans précédent (GIEC, 2021^[14]). Des changements ont été constatés dans bon nombre de phénomènes météorologiques extrêmes depuis le milieu du XX^e siècle environ. Chaque nouvelle hausse du réchauffement climatique entraîne une hausse clairement perceptible de l'intensité et de la fréquence des extrêmes de chaleur, y compris les canicules, des fortes précipitations et des canicules marines. Elle entraîne également une augmentation de la proportion de cyclones tropicaux intenses (GIEC, 2021^[14]). Le Graphique 3.1 présente une synthèse du nombre de régions où les facteurs d'impact climatique devraient changer entre 1.5 et 2 °C de réchauffement. Les « changements » se réfèrent à des conditions physiques du système climatique (par exemple, des moyennes, des phénomènes et des extrêmes) qui affectent un élément de la société ou des écosystèmes. Le graphique montre que les changements touchant plusieurs facteurs d'impact climatique seraient plus étendus avec un réchauffement de 2 °C qu'avec un réchauffement de 1.5 °C. Cette tendance serait encore plus marquée à l'échelle mondiale avec un niveau de réchauffement plus élevé.

Graphique 3.1. Synthèse du nombre de régions où les facteurs d'impact climatique devraient changer



Note : Nombre de régions terrestres et côtières (a) et de régions de haute mer (b) dans lesquelles chaque facteur d'impact climatique devrait augmenter ou diminuer avec un niveau de confiance élevé (barres foncées) ou moyen (barres claires). Les « enveloppes » de fond plus claires représentent le nombre maximum de régions pour lesquelles chaque facteur d'impact climatique est pertinent. Les enveloppes sont symétriques par rapport à l'axe des abscisses, de manière à représenter le nombre maximum de régions pour lesquelles une hausse (partie supérieure) ou une baisse (partie inférieure) du facteur d'impact climatique est pertinente.

Source : Figure SPM.9 de (GIEC, 2021^[14]).

La hausse des températures et la fréquence accrue des canicules et des sécheresses devraient prolonger les saisons des incendies, c'est-à-dire les périodes pendant lesquelles les conditions météorologiques sont propices aux feux de végétation. Par conséquent, l'allongement de ces saisons augmente le risque de feux (Jolly et al., 2015^[15] ; Ross, 6 août 2020^[16] ; Gomes Da Costa et al., 2020^[17]).

Plusieurs grands feux de végétation se sont déclarés dans diverses régions du monde au cours des dernières années. En 2017, 580 000 hectares au Chili ont été ravagés par de gigantesques incendies, ce qui a représenté un coût de 362.2 millions USD, correspondant notamment aux opérations de lutte contre le feu, à la reconstruction des logements et aux aides aux secteurs productifs (González et al., 2020^[18]). En Australie, des feux de brousse extrêmes ont dévasté plus de 18.6 millions d'hectares pendant la saison 2019-20, entraînant de l'ordre de 1.3 milliard USD de pertes (CDP, 2020^[19]). La chaleur extrême

qui s'est abattue sur la Méditerranée orientale au début du mois d'août 2021 a provoqué de graves feux de végétation en Grèce et en Turquie. Un peu plus tard dans le mois, la vague de chaleur s'est étendue vers l'ouest, déclenchant des incendies dans d'autres pays d'Europe et d'Afrique, notamment en Italie, en France et en Algérie (Frost, 2021^[20] ; Mezahi, 2021^[21] ; Frost, 2021^[22]). En 2020, les incendies ont brûlé une superficie record de 1.7 million d'hectares en Californie. Au moment de la rédaction du présent document, les incendies de la saison de 2021 avaient déjà détruit 0.9 million d'hectares. Ils ont menacé directement la Giant Forest, qui abrite plus de 2 000 séquoias (Reuters, 2021^[23] ; Keeley et Syphard, 2021^[24]). L'Encadré 3.1 décrit les impacts récents des températures record enregistrées dans les régions de la côte Pacifique des États-Unis et du Canada et leur relation avec le changement climatique.

Les vitesses de pointe des vents des cyclones tropicaux les plus intenses, ainsi que la proportion de cyclones tropicaux intenses (catégories 4-5), devraient augmenter dans le monde sous l'effet du réchauffement climatique (GIEC, 2021^[14]). Des tempêtes cycloniques ou convectives plus fréquentes ou plus intenses augmenteront également la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes (Witze, 2018^[25]). Le risque d'inondation côtière augmentera probablement en raison de l'élévation du niveau de la mer, ce qui pourrait causer une hausse des crues liées aux marées. Par effet d'entraînement, cela pourrait augmenter les taux d'érosion, et conduire à des inondations (et des intrusions d'eau salée) de plus grande ampleur à la suite d'une onde de tempête.

La section 3.5 présente une analyse approfondie de la quantification des impacts du changement climatique, fondée sur l'attribution des phénomènes extrêmes. Le chapitre se concentre sur les méthodes et les incertitudes associées à la science de l'attribution. Il s'interroge sur les moyens d'améliorer les estimations actuelles et futures des impacts du changement climatique dus aux phénomènes météorologiques extrêmes. L'attribution des phénomènes extrêmes a évolué, principalement aux fins d'estimer les changements dans la probabilité d'être témoin d'un phénomène météorologique extrême précis. Elle vise à faire mieux comprendre comment les conditions météorologiques extrêmes actuelles pourraient s'aggraver sous l'effet du changement climatique anthropique. La section 3.5.3 examine de quelle façon la vulnérabilité de communautés qui ont été exposées à des phénomènes extrêmes comprenant un puissant signal de changement climatique influe sur le risque de pertes et de dommages associé à ces phénomènes (Philip et al., 2021^[26]).

Encadré 3.1. Canicules récentes dans les régions de la côte Pacifique des États-Unis et du Canada

La canicule de 2021 du Pacifique Nord-Ouest a touché les États-Unis et l'ouest du Canada pendant quatre jours, du 26 au 29 juin. Une grande masse d'air à haute pression, appelée « dôme de chaleur », s'est installée au-dessus de régions qui ne sont pas connues pour être sujettes à des chaleurs extrêmes, notamment Portland, en Oregon, et Seattle, dans l'État de Washington, aux États-Unis, et Vancouver, en Colombie-Britannique, au Canada. Les températures ont largement franchi les 40 °C dans de nombreuses régions. Qui plus est, ces valeurs extrêmes ont été enregistrées un mois entier avant la période climatologiquement la plus chaude de l'année, qui a normalement lieu à la fin du mois de juillet ou au début du mois d'août (Philip et al., 2021^[26]). La température maximale de la région a été enregistrée à Lytton, en Colombie-Britannique, avec 49.6 °C, ce qui constitue un nouveau record pour l'ensemble du pays (Di Liberto, 2021^[27]). Peu après l'établissement de ce record, Lytton a été ravagé par un incendie.

Selon l'Indice des extrêmes climatiques (Climate Extreme Index) du Centre national d'information sur l'environnement, le Pacifique Nord-Ouest a connu des températures plus extrêmes au cours des 20 dernières années (Di Liberto, 2021^[27]). D'après une étude faisant partie d'un corpus croissant de recherches dites « analyses d'attribution rapide », cette canicule aurait été extrêmement improbable en l'absence de changement climatique anthropique : on a estimé statistiquement que la probabilité d'occurrence d'un tel événement avec le climat actuel était d'une fois sur 1000 ans (Philip et al., 2021^[26]).

Ces températures élevées ont été particulièrement dommageables pour la région, qui n'est pas adaptée à ce type de chaleur extrême. Plus de 500 décès et 180 feux de végétation ont été enregistrés en Colombie-Britannique (Schiermeier, 2021^[28]) et environ 200 décès liés à de tels feux en Oregon et dans l'État de Washington (Popovich et Choi-Schagrin, 2021^[29]). Une étude a révélé une forte augmentation des visites dans les services d'urgence. Près de 3 000 personnes dans le Pacifique Nord-Ouest se sont rendues dans un service d'urgence entre le 25 et le 30 juin en raison de troubles liés à la chaleur, soit sept fois plus qu'en juin 2019 (Schramm et al., 2021^[30]).

La canicule de 2021 a fait grimper les températures sur le littoral à plus de 50 °C, entraînant une mortalité massive dans la vie marine et la restructuration d'écosystèmes marins entiers. Des estimations préliminaires indiquent que cette chaleur extrême a causé la mort de plusieurs milliards d'animaux marins. Les moules qui vivent sur le littoral et les espèces marines qui vivent dans les bancs de moules, en particulier, ont payé un lourd tribut. Ces pertes peuvent avoir des effets en cascade sur d'autres animaux. Les étoiles de mer, par exemple, se nourrissent de moules ; les canards marins se repaissent également de moules avant de migrer vers leurs lieux de reproduction estivale dans l'Arctique (Einhorn, 2021^[31]).

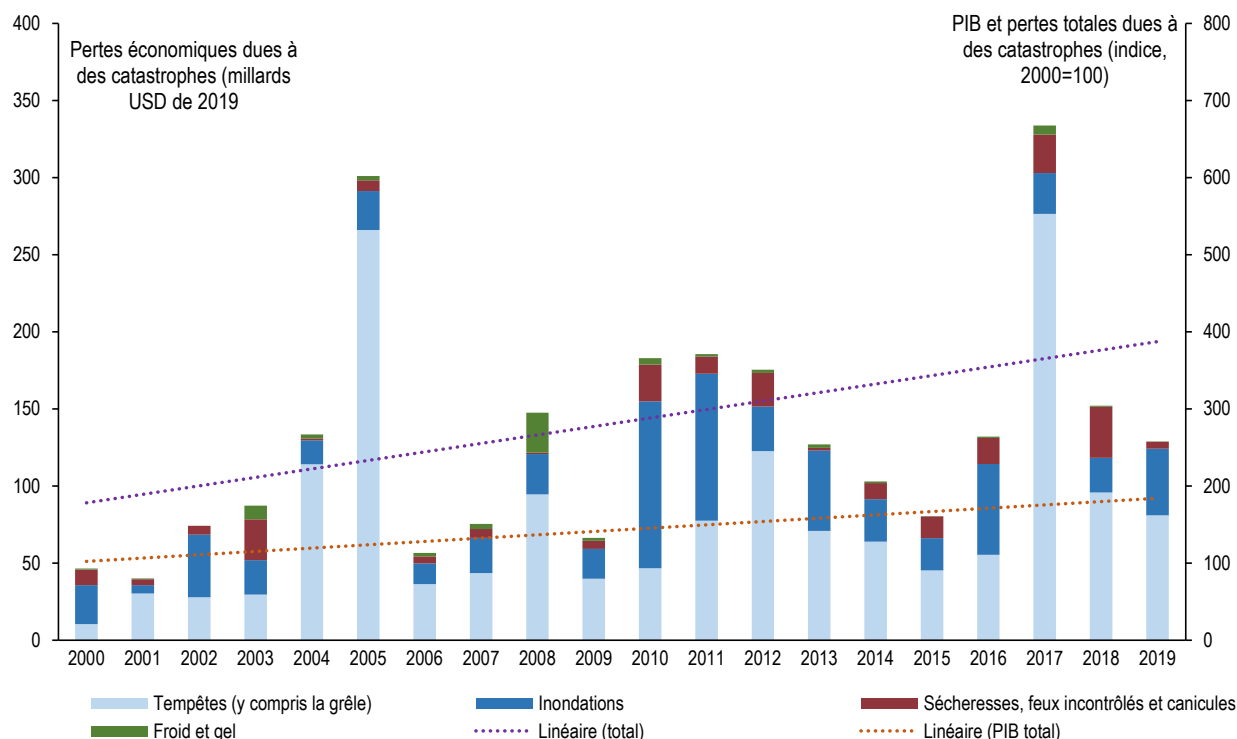
Exemples de pertes économiques dues à des phénomènes météorologiques extrêmes

Cette sous-section présente des données sur les pertes et dommages économiques causés par les phénomènes météorologiques extrêmes dans le passé. Les pertes et dommages non économiques sont tout aussi importants, mais moins facilement quantifiables. Ils sont abordés dans le chapitre 1 puis examinés sous l'angle de l'incertitude dans le chapitre 2.

Les phénomènes météorologiques extrêmes, notamment les tempêtes, les inondations, les sécheresses, les feux de végétation, les canicules, le froid et le gel², peuvent entraîner des pertes économiques, des dommages importants et des pertes de revenus et de moyens de subsistance. Ces pertes concernent aussi bien la sphère privée que la sphère publique. Elles peuvent endommager les bâtiments et

infrastructures privés, tels que les habitations et les entreprises. Les bâtiments et infrastructures publics exposés comprennent les écoles, les hôpitaux, les routes et les infrastructures de production et de distribution d'électricité. Les pertes économiques déclarées à la suite de phénomènes liés au climat sont très fluctuantes d'une année à l'autre. Cependant, au niveau mondial, elles augmentent à un rythme beaucoup plus rapide que le produit intérieur brut (PIB) depuis 2000 (voir Graphique 3.2)³.

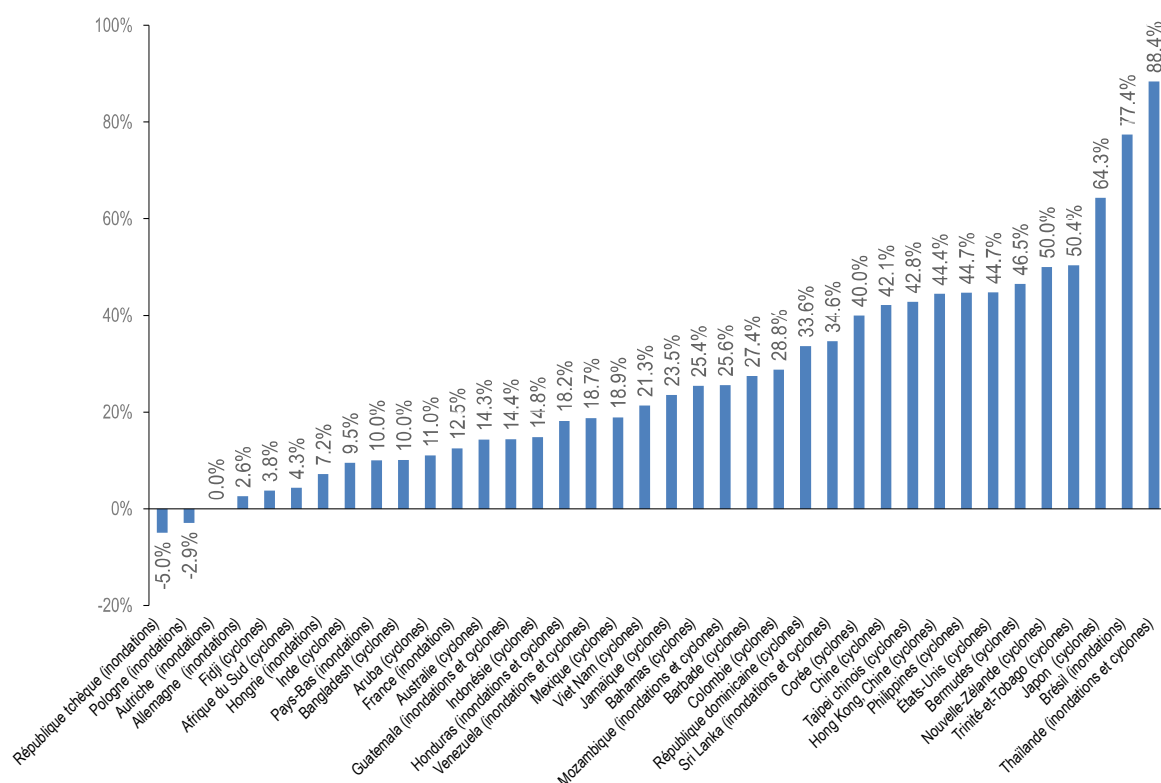
Graphique 3.2. Pertes économiques dues à des catastrophes liées au climat par type (milliards USD)



Source : Calculs effectués par l'OCDE à partir des données relatives aux pertes économiques fournies par Swiss Re sigma et des données relatives au produit intérieur brut figurant dans les *Perspectives de l'économie mondiale* (base de données) (avril 2021).

La trajectoire des changements climatiques futurs et l'impact de ces changements sur les pertes économiques dans des pays ou des lieux spécifiques sont très incertains. Néanmoins, plusieurs études ont examiné les impacts potentiels. Par exemple, avec le concours de Swiss Re, S&P Global Ratings (2015^[32]) a estimé que le niveau des dommages causés par une inondation ou un cyclone survenant 1 année sur 250 (c'est-à-dire un événement ayant 0.4 % de probabilité de se produire au cours d'une année donnée) augmenterait sensiblement dans de nombreux pays d'ici 2050 (voir Graphique 3.3). L'accroissement de la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi que la poursuite du développement dans les zones à risque, entraîneront très certainement une augmentation des pertes liées aux catastrophes climatiques à l'avenir.

Graphique 3.3. Augmentation des dommages attendus dus à un cyclone ou à une inondation survenant 1 année sur 250 à l'horizon 2050 (en pourcentage)



Note : Les estimations des dommages futurs dus aux cyclones tropicaux calculées par S&P Global Ratings reposent sur les hypothèses suivantes : i) une augmentation de la vitesse maximale du vent de 1 % à 5 % ; ii) aucun changement dans la fréquence de formation de cyclones ; iii) une élévation du niveau de la mer de +25 cm à +40 cm dans les différents bassins ; et iv) une augmentation des précipitations liées aux cyclones. Les estimations concernant les inondations reposent sur les estimations des changements des périodes de retour pour des crues centennales, élaborées par Hirabayashi et al. (2013^[33]).

Source : Calculs effectués par l'OCDE à partir des estimations des dommages directement causés par une inondation (14 émetteurs souverains) ou un cyclone (30 émetteurs souverains) survenant 1 année sur 250, calculées par S&P Global Ratings (2015^[32]).

Phénomènes qui se manifestent lentement

Les Accords de Cancún (conclus lors de la COP 16 de la CCNUCC) définissent les aléas liés au climat suivants comme des « phénomènes qui se manifestent lentement » : élévation du niveau de la mer, hausse des températures, acidification des océans, recul des glaciers et effets connexes, salinisation, dégradation des terres et des forêts, déclin de la biodiversité et désertification (CCNUCC, 2010^[8]). Contrairement aux phénomènes météorologiques extrêmes, les phénomènes qui se manifestent lentement se déroulent sur des décennies ou des siècles. Cette sous-section dresse un bref aperçu de l'état des connaissances sur ces phénomènes, en s'appuyant sur le Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et les terres émergées (GIEC, 2019^[34]), le Rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (GIEC, 2019^[35]), le commentaire et le résumé de ces rapports figurant dans van der Geest et van den Berg (2021^[36]) et la contribution du Groupe de travail I au sixième Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2021^[14]).

- **Hausse des températures** : la température à la surface du globe a augmenté de 1.09 °C en 2011-20 par rapport à 1850-1900⁴, mais toutes les régions ne connaissent pas le même

réchauffement. On a mesuré des hausses de température nettement plus importantes sur les terres émergées (1.59 °C en moyenne) que sur les océans (0.88 °C en moyenne). Les régions polaires connaissent également un réchauffement plus important que les zones tropicales, la hausse des températures dans l'Arctique étant plus de deux fois supérieure au réchauffement moyen mondial. Les changements dus à la hausse des températures comprennent les canicules et les modifications du fonctionnement des écosystèmes (en particulier dans les hautes latitudes).

- **Élévation du niveau de la mer** : les niveaux actuels de l'élévation du niveau de la mer d'origine anthropique résultent principalement de la dilatation thermique de l'eau de mer causée par la hausse des températures, la fonte des glaciers et des inlandsis apportant une contribution croissante au phénomène. Au cours du XX^e siècle, la montée du niveau de la mer a atteint 1 à 2 millimètres (mm) par an dans la plupart des régions, mais le rythme s'est accéléré pour atteindre 3.7 mm par an entre 2006 et 2018. Les projections de l'élévation annuelle du niveau de la mer d'ici la fin du XXI^e siècle s'établissent à 4-9 mm par an dans un scénario d'émissions de GES faibles (RCP 2.6) et à 10-20 mm par an dans un scénario d'émissions de GES élevées (RCP 8.5). Entre autres effets négatifs, la montée du niveau de la mer accentue les phénomènes extrêmes liés aux niveaux marins, tels que les ondes de tempête et les vagues, et les inondations côtières qui en résultent. Pour les PEID et les deltas côtiers de faible altitude, tels que le sud du Bangladesh, l'élévation du niveau de la mer représente à l'évidence un risque existentiel particulièrement important. Les risques et incertitudes liés à l'élévation moyenne et aux épisodes de hausse extrême du niveau de la mer sont examinés dans l'Encadré 3.2. La section 3.4 se penche sur les impacts potentiels de l'élévation du niveau de la mer et des épisodes de hausse extrême ainsi que sur les pertes et les dommages qui en découlent, en se concentrant sur les PEID.
- **Salinisation** : dans le cas de la salinisation, un sol non salin devient suffisamment salin pour contrarier la croissance des végétaux, ce processus étant dû principalement à l'élévation du niveau de la mer et à l'irrigation. Les principales conséquences de la salinisation sont la dégradation des sols et la désertification, le déclin de la biodiversité et les effets néfastes sur la production agricole, les ressources en eau douce et la santé. On estime que le sel affecte 7.4 % des terres dans le monde.
- **Acidification des océans** : le dioxyde de carbone (CO₂) présent dans l'atmosphère forme un acide faible lorsqu'il se dissout dans l'eau de mer. De ce fait, le pH de l'océan diminue à mesure que les concentrations de CO₂ atmosphérique augmentent, ce qui est préjudiciable à la vie marine. L'une des conséquences notables de l'acidification des océans est le blanchissement des coraux. Au cours des trois dernières décennies, le pH de l'eau de mer a diminué de 0.017 à 0.027 par décennie du fait de l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, un changement considéré par le GIEC comme « inhabituel au cours des deux derniers millions d'années » ; ce déclin pourrait s'accélérer de 90 % dans un scénario d'émissions extrêmement élevées (RCP 8.5). L'acidification de l'océan a notamment pour effet d'appauvrir la biodiversité, par exemple en réduisant la calcification des organismes et en altérant les espèces de poissons, les invertébrés et les coraux.
- **Recul des glaciers** : les glaciers reculent lorsque la masse de neige et de glace des glaciers fond à un rythme plus rapide que celui de leur accumulation. Il en résulte une modification du débit des rivières de fonte, qui a des effets négatifs sur la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et contribue à l'élévation du niveau de la mer. Les pertes de glace sur les terres émergées, en particulier les vastes inlandsis du Groenland et de l'Antarctique et les zones de haute montagne des Andes, de l'Himalaya et des Alpes, contribuent à hauteur d'environ 1.81 mm à l'élévation du niveau de la mer chaque année. Le recul des glaciers peut avoir des répercussions locales et régionales sur le débit des cours d'eau, les écosystèmes et les moyens de subsistance agricoles. Le scénario d'émissions extrêmement élevées (RCP 8.5) projette une diminution de la masse des glaciers de 36 % d'ici 2100, et le scénario d'émissions faibles (RCP 2.6) une diminution de 18 %.

- **Dégradation des terres et des forêts** : la dégradation des terres désigne une tendance négative des propriétés foncières et de l'état des terres, qui se manifeste souvent par un amoindrissement ou une disparition de la productivité biologique, de l'intégrité écologique et/ou de la valeur pour les humains. La dégradation des terres affecte quelque 3.2 milliards de personnes dans le monde. La dégradation des terres et des forêts peut avoir un large éventail de répercussions sur l'environnement naturel et la société (par ex., la perte de services écosystémiques).
- **Désertification** : il s'agit d'une dégradation des terres en zones arides, semi-arides et subhumides-sèches, qui résulte de l'interaction de différents processus humains et environnementaux, notamment la sécheresse. Ses principaux impacts sont liés à la perte de services écosystémiques et à ses conséquences pour les moyens de subsistance des populations tributaires des ressources naturelles.
- **Déclin de la biodiversité** : la biodiversité est la variabilité des organismes vivants des écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques. Elle comprend la variabilité au niveau génétique, au niveau des espèces et au niveau des écosystèmes (CDB, 1992^[37]). La biodiversité décline lorsque la variabilité à l'un de ces niveaux s'amenuise. Le déclin de la biodiversité peut entraîner une perte de fonctions écosystémiques. Cela entraîne, par ricochet, un déclin des services écosystémiques, tels que le piégeage du carbone et la capacité d'adaptation à de nouveaux changements climatiques. Les principaux facteurs d'appauvrissement de la biodiversité sont le changement d'affectation des sols, la surexploitation des animaux et des végétaux (y compris leur commerce illégal), la pollution, les espèces non indigènes envahissantes et, de plus en plus, le changement climatique (Pecl et al., 2017^[38]). D'ailleurs, les approches visant à lutter contre le déclin de la biodiversité présentent de nombreuses synergies avec les approches envisagées par le programme mondial d'action pour le climat (voir chapitre 1).

Encadré 3.2. Incertitude concernant l'élévation du niveau de la mer et les phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer

Le sixième Rapport d'évaluation du GIEC (AR6) prévoit une élévation du **niveau moyen de la mer** de *probablement* 0.6 à 1.0 m d'ici à 2100 si les émissions de gaz à effet de serre continuent à augmenter (scénario à émissions très élevées, RCP 8.5) (Oppenheimer et al., 2019^[39] ; Fox-Kemper et al., 2021^[40]). Si les émissions diminuent suffisamment pour que l'on puisse atteindre l'objectif de l'Accord de Paris consistant à limiter le réchauffement de la planète « nettement en dessous de 2°C » (scénario à émissions faibles, RCP 2.6), le niveau moyen mondial de la mer augmenterait probablement de 0.3 à 0.6 m d'ici à 2100 (Oppenheimer et al., 2019^[39] ; Fox-Kemper et al., 2021^[40]).

Quatre aspects sont importants pour la gestion des risques de pertes et de dommages liés à l'élévation du niveau de la mer (chapitre 4). Premièrement, les fourchettes d'élévation indiquées ci-avant sont des *fourchettes probables*, ce qui signifie qu'il y a 17 % de chances que la montée du niveau de la mer dépasse cette fourchette pour un scénario d'émissions donné. L'incertitude scientifique entourant ce **scénario « haut » de l'élévation moyenne du niveau de la mer** est plus importante que celle entourant la fourchette probable en raison de l'**incertitude profonde** qui prévaut (chapitre 4, section 4.2) concernant la fonte rapide – possible, mais peu probable – des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique. Dans le scénario RCP 8.5, un relèvement de 2 m du niveau de la mer d'ici à 2100 ne peut être exclu (Fox-Kemper et al., 2021^[40]).

Deuxièmement, le phénomène d'élévation du niveau de la mer va se poursuivre pendant des siècles, voire des millénaires, même lorsque les concentrations de GES seront stabilisées, en raison du réchauffement continu des océans et de la fonte des inlandsis. Le sixième Rapport d'évaluation du GIEC prévoit que le niveau moyen mondial des mers augmentera de 2 à 6 mètres si le réchauffement ne dépasse pas 2 °C, et de 19 à 22 mètres s'il atteint 5 °C au cours des 2000 prochaines années.

Troisièmement, le niveau des mers ne s'élève pas uniformément sur le globe mais varie selon les régions, principalement en raison de trois facteurs : i) changements dans la circulation océanique et différences régionales des taux de dilatation thermique ; ii) redistribution de la masse au sein de la cryosphère (due à la fonte des inlandsis) et de l'hydrosphère (en raison de changements dans le stockage de l'eau terrestre) ; et iii) mouvements verticaux du sol (Lowe et al., 2009^[41] ; Nicholls et al., 2013^[42] ; Bamber et al., 2019^[43] ; Hinkel et al., 2019^[44] ; Stammer et al., 2019^[45]).

Quatrièmement, l'élévation du niveau moyen de la mer est un aléa qui se manifeste lentement, mais la plupart de ses impacts ne seront pas directement ressentis. En fait, l'élévation progressive du niveau moyen de la mer augmentera la hauteur des **phénomènes extrêmes liés aux niveaux marins**, tels que les marées, les ondes de tempête et les vagues (Oppenheimer et al., 2019^[39] ; Wahl et al., 2017^[46] ; Woodroffe, 2008^[47]). À travers cet effet, les phénomènes extrêmes liés aux niveaux marins qui sont actuellement rares (par ex. qui se produisent une fois par siècle) deviendront courants (par ex. annuels) d'ici à 2100 dans tous les scénarios d'émissions (Menéndez et Woodworth, 2010^[48] ; Oppenheimer et al., 2021^[49]).

Par conséquent, les niveaux marins extrêmes actuels sont généralement entourés d'une plus grande incertitude que le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer au XXI^e siècle (Wahl et al., 2017^[46]). Cela s'explique principalement par l'absence d'observations locales suffisamment longues des niveaux marins extrêmes (par ex. pour les PEID) (Nurse et al., 2014^[50]). Les modèles marée-onde de tempête et les modèles de vague peuvent fournir les informations manquantes. Par exemple, on dispose d'un nombre croissant de jeux mondiaux de données sur les niveaux marins extrêmes, générés à l'aide de modèles numériques (Muis et al., 2020^[51] ; Muis et al., 2016^[52] ; Vousdoukas et al., 2017^[53]). Ces données peuvent être utilisées pour effectuer des analyses locales dans les PEID où les données locales font défaut. Si, en général, ces modèles reproduisent plutôt correctement les niveaux marins extrêmes observés, leurs résultats sont souvent décevants pour les zones menacées par les cyclones tropicaux. Cela est dû au fait que les données d'entrée des modèles climatiques n'ont pas la résolution spatiale ou temporelle requise pour intégrer complètement les vents violents des cyclones tropicaux. Ces modèles ne disposent pas non plus d'un nombre suffisant de cyclones tropicaux pour établir des statistiques fiables sur les valeurs extrêmes (Appendini et al., 2017^[54] ; Hodges, Cobb et Vidale, 2017^[55] ; Mentaschi et al., 2020^[56] ; Mentaschi, 2018^[57] ; Muis et al., 2020^[51]).

Pour la modélisation des vagues, une autre incertitude majeure découle du manque de données bathymétriques haute résolution, qui sont nécessaires pour déterminer par quels mécanismes les vagues du large se propagent sur le rivage et causent des dommages (Athanasίου et al., 2019^[58]).

Note : Dans la terminologie du GIEC, *probable* signifie 66 % de chances. Ici, et dans le contexte de la science du niveau de la mer, la fourchette probable fait référence aux valeurs comprises entre les percentiles 17 et 83 de la distribution de probabilité de la future élévation du niveau de la mer. Cela signifie que les experts estiment qu'il y a 66 % de chances que le niveau des mers se situe dans la fourchette probable et 17 % de chances qu'il soit supérieur à cette fourchette probable.

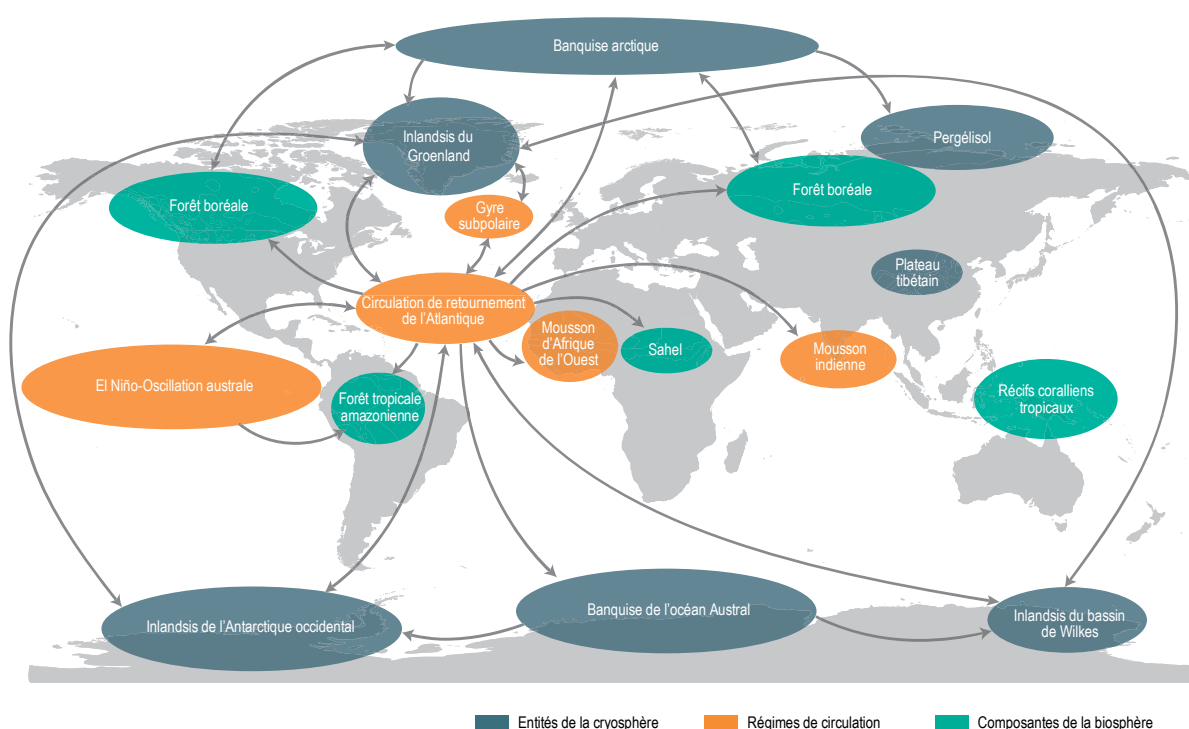
Points de basculement

Dans son acception commune, un « point de basculement » désigne le moment où un petit changement déclenche un grand bouleversement dans l'état futur d'un système (Gladwell, 2000^[59]). Dans le contexte du changement climatique, un « point de basculement climatique » est un point où un petit changement du climat (par ex. un changement de la température planétaire) déclenche un grand bouleversement dans une vaste partie du système climatique, de nature à modifier son état futur (Lenton et al., 2008^[4]). Le franchissement d'un point de basculement provoque généralement une accélération du changement et, par nature, est difficile à inverser. La transition vers un état différent qui en résulte peut sembler rapide ou lente d'un point de vue humain. Cette perception tient au fait que le rythme de la transition dépend du système considéré (par exemple, l'atmosphère se modifie rapidement, la biosphère à un rythme intermédiaire, et les inlandsis à un rythme généralement lent).

L'existence d'un point de basculement est conditionnée par la présence dans un système d'une rétroaction positive fortement amplificatrice (Levermann et al., 2011^[60]). Cette rétroaction peut amplifier un petit changement initial et le transformer en conséquence de grande ampleur. Le processus peut aussi être « auto-entretenu », sans qu'il soit nécessaire de le forcer une fois le point de basculement franchi (Scheffer et al., 2012^[61]). Fondamentalement, la force relative des boucles de rétroaction positives (amplificatrices) et négatives (modératrices) dans une partie quelconque du système climatique peut changer à mesure que le climat global évolue et que cela influe sur le sous-système considéré. Des points de basculement climatique apparaissent lorsque l'équilibre des boucles de rétroaction dans une partie du système climatique se modifie. Lors de cette modification, les boucles positives (amplificatrices) prennent le pas sur les boucles négatives (modératrices). Ce processus favorise un changement auto-entretenu dans la partie du système climatique en question (Lenton et Williams, 2013^[62]). Les boucles positives peuvent également amplifier le changement de la température mondiale. Cependant, cela n'est pas une condition nécessaire pour qu'un point de basculement apparaisse.

Les « éléments basculants » du système climatique (Graphique 3.4) s'entendent comme des parties (ou des sous-systèmes) du système climatique d'échelle au moins sous-continentale qui sont susceptibles de franchir un point de basculement climatique (Lenton et al., 2008^[4]). Lorsqu'ils sont proches d'un point de basculement, ces éléments peuvent basculer vers un état qualitativement différent sous l'effet de petites perturbations externes ou de la variabilité interne du climat (Lenton, 2011^[63]). Cependant, un forçage important du climat est généralement nécessaire pour les amener près d'un point de basculement. Les éléments basculants pertinents pour l'action publique sont définis ici comme ceux qui pourraient franchir un point de basculement au cours de ce siècle en raison du forçage climatique anthropique.

Graphique 3.4. Éléments basculants potentiels du système climatique



Note : Carte mondiale des éléments basculants potentiels du système climatique et des cascades de basculement potentielles. Les flèches indiquent les interactions possibles entre éléments basculants qui pourraient entraîner des cascades de basculement, d'après l'avis des experts. Source : Carte mondiale tirée de Peel, M. C., Finlyson, B. L. et McMahon, T. A. (Université de Melbourne).

Récemment, des éléments attestant que certains points de basculement climatique pourraient devenir proches – et qu’au moins l’un d’eux pourrait avoir été franchi dans l’Antarctique occidental – ont amené certaines voix à déclarer l’état d’urgence climatique et écologique (Lenton et al., 2019^[64]). Le Tableau 3.1 récapitule les différents points de basculement climatique pertinents pour l’action publique et évalue la probabilité qu’ils soient franchis pour différents niveaux de réchauffement climatique (à partir des niveaux de l’ère préindustrielle). L’évaluation se fonde sur des données paléoclimatiques et des données d’observation, des projections futures établies à partir de différents modèles [par ex. (Drijfhout, 2015^[65])], et des probabilités établies par des experts pour différents niveaux de réchauffement (Kriegler et al., 2009^[66]). Une fois un seuil franchi, la vitesse à laquelle les conséquences s’enchaînent varie selon les éléments basculants (Ritchie et al., 2021^[67]). Le processus peut prendre quelques décennies dans certains cas, et plusieurs siècles dans d’autres.

Tableau 3.1. Probabilité de franchissement de points de basculement climatique pour différents niveaux de réchauffement du climat

Point de basculement	Réchauffement climatique (à partir des niveaux de l'ère préindustrielle)				
	≤1.5 °C	>1.5 °C à <2 °C	2 °C à <3 °C	3 °C à 5 °C	>5 °C
Effondrement de l'inlandsis du Groenland	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Probable	Très probable	Quasiment certain
Effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique occidental	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Probable	Très probable	Quasiment certain
Effondrement de l'inlandsis du bassin de Wilkes	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Probable	Quasiment certain
Fonte de la banquise arctique d'été	Très improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Quasiment certain		
Fonte de la banquise arctique permanente	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Probable
Fonte brutale de la banquise de l'océan Austral	Très improbable		Improbable		
Effondrement de la convection dans le gyre subpolaire	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Probable	Probable
Effondrement de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC)	Très improbable	Très improbable	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	Probable
Changement de l'ENSO (El Niño-Oscillation australe)	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	À peu près aussi probable qu'improbable
Fonte brutale des glaciers du plateau tibétain	Très improbable	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	À peu près aussi probable qu'improbable	À peu près aussi probable qu'improbable
Fonte brutale du pergélisol	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Improbable
Dépérissement de la forêt boréale	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Très improbable	Improbable	Improbable
Dépérissement de la forêt tropicale amazonienne	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Improbable	Improbable	À peu près aussi probable qu'improbable
Verdissement abrupt du Sahel	Exceptionnellement improbable	Exceptionnellement improbable	Très improbable	Très improbable	Très improbable
Dégradation des récifs coralliens tropicaux	Très probable	Très probable	Quasiment certain	Quasiment certain	Quasiment certain

Note : L'évaluation de ces probabilités repose sur l'échelle et les termes de probabilité bien établis du GIEC (voir aussi chapitre 2, section 2.4) : « quasiment certain » = probabilité de 99-100 % ; « très probable » = probabilité de 90-100 % ; « probable » = probabilité de 66-100 % ; « à peu près aussi probable qu'improbable » = probabilité de 33-66 % ; « improbable » = probabilité de 0-33 % ; « très improbable » = probabilité de 0-10 % ; « exceptionnellement improbable » = probabilité de 0-1 %. Les probabilités sont traitées de façon cumulative en ce qui concerne la hausse de la température ; ainsi, pour une plage de températures donnée (par exemple, >1.5 °C à <2 °C), la probabilité donnée pour un point de basculement spécifique est la probabilité cumulative de le franchir à tous les niveaux de réchauffement climatique jusqu'à l'extrémité supérieure de cette plage (ici <2 °C). Les probabilités sont données pour chaque point de basculement en tant qu'événement indépendant, c'est-à-dire abstraction faite des interactions causales qui peuvent exister entre les événements. Globalement, on peut s'attendre à ce que ces interactions contingentes rendent d'autres basculements plus probables (bien qu'il existe quelques contre-exemples spécifiques) (Kriegler et al., 2009^[66] ; Cai, Lenton et Lontzek, 2016^[68] ; Wunderling et al., 2021^[69]).

L'évaluation des probabilités de franchissement des points de basculement présentée dans le tableau 3.1 peut être résumée comme suit : avec un réchauffement inférieur ou égal à 1.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, il est improbable (probabilité de 0-33 %) ou très improbable (probabilité de 0-10 %) que les

points de basculement de la cryosphère ou du couple océan-atmosphère soient franchis. Le fait qu'une partie de l'inlandsis de l'Antarctique occidental ait peut-être franchi un point de basculement constitue une exception. Cependant, avec un réchauffement compris entre 1.5 °C et 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels (c'est-à-dire la fourchette de l'Accord de Paris), il existe une probabilité de 33 à 66 % que les points de basculement des inlandsis soient franchis. Les probabilités sont les mêmes concernant la fonte totale de la banquise arctique d'été et l'effondrement de la convection profonde dans la mer du Labrador. Avec un réchauffement compris entre 2 °C et 3 °C par rapport aux niveaux préindustriels, il est probable (66-100 %) que les points de basculement des inlandsis seront franchis. Il est aussi quasiment certain (99-100 %) que la banquise arctique d'été et les récifs coralliens tropicaux disparaîtront. Avec un réchauffement compris entre 3 °C et 5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, il est très probable que les points de basculement des inlandsis seront franchis. Il est à peu près aussi probable qu'improbable (33-66 %) que des réorganisations profondes s'opèrent dans la circulation océanique et atmosphérique.

Compte tenu de ces probabilités, il convient d'évaluer les impacts biophysiques du franchissement de points de basculement particuliers, ainsi que la façon dont ils se traduisent en impacts sociaux et en coûts économiques. Le Tableau 3.2 résume les impacts climatiques biophysiques d'un sous-ensemble de points de basculement, mis à jour à partir de Lenton et Ciscar (2012^[70]). Ces impacts englobent les effets sur la température, le niveau de la mer, les précipitations, la circulation atmosphérique, la circulation océanique, les cycles biogéochimiques, les régimes de variabilité climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes. Le tableau offre ainsi un aperçu non exhaustif des interconnexions du système climatique. Les effets sur la température peuvent se manifester directement, au travers de modifications de l'albédo de surface (réflectivité), ou indirectement, au travers de changements des émissions de GES, notamment les émissions de CO₂ et de méthane (CH₄) dues au dégel du pergélisol. La plupart des effets sur la température recensés sont des boucles de rétroaction positives qui augmenteront encore les températures mondiales.

Tableau 3.2. Effets potentiels sur le climat du franchissement de différents points de basculement

Événement de basculement	Température	Niveau de la mer	Précipitations	Cycles biogéochimiques	Phénomènes extrêmes
Fonte de l'inlandsis du Groenland	Local ↑	≤7 m mondial ≤0.5 m/siècle irrégulier	Évolution au niveau local > pluie, perturbation de la MAO	Inondation du pergélisol, ↑CO ₂ , CH ₄	Ondes de tempête, icebergs
Effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique occidental	Local ↑	≤3.3 m abrupt ≤1 m/siècle irrégulier	Évolution au niveau local	(comme ci-dessus)	Ondes de tempête, icebergs
Effondrement de l'inlandsis du bassin de Wilkes	Local ↑	≤4 m abrupt irrégulier	Évolution au niveau local	(comme ci-dessus)	Ondes de tempête, icebergs
Fonte de la banquise arctique d'été	↑Arctique & hém. N.	(effet minime)	Évolution au niveau local neige > pluie	↑Dégel du pergélisol, ↑CO ₂ , CH ₄	Chutes de neige extrêmes en Europe
Effondrement de la convection dans le gyre subpolaire	↓Atlantique N.	Évolutions régionales ↑0.3 m dans certaines parties de l'Atlantique N.			Phénomènes de blocage hivernal par le froid amplifiés en Europe
Effondrement de l'AMOC	↓Hém. N. ↑Hém. S.	Évolutions régionales ↑0.8 m dans certaines parties de l'Atlantique N.	Assèchement du Sahel, ↓MAO, ↓MEI, ↓MAE, Amazonie	↑CO ₂ venant des océans et des terres émergées, changements de biome	Hivers froids en Europe, déplacement des ouragans vers le sud
Changement de l'ENSO	↑Asie du S., Australie du S.... ↓Nouvelle-Zélande	Effets régionaux	↓Asie du S.E., Australie de l'E., Amazonie...	↑CO ₂ , baisse du stockage terrestre de carbone	Sécheresses, inondations
Dépérissement de la forêt boréale	↓hiver local, ↑mondial	–	↓régional ?	↑CO ₂ , déclin de la biodiversité	Incendies, infestations d'insectes
Dépérissement de la forêt amazonienne	↑régional, ↑mondial	–	↓régional	↑CO ₂ , déclin de la biodiversité	Sécheresses, incendies, téléconnexions

Note : MAO=Mousson en Afrique de l'Ouest ; MEI=mousson d'été indienne ; MAE=mousson en Asie de l'Est ; ONA=oscillation nord-atlantique ; OAM=oscillation atlantique multidéennale ; OIP=oscillation interdéennale du Pacifique ; Oa=oscillation australe.

Source : mis à jour à partir de (Lenton et Ciscar, 2012^[70]).

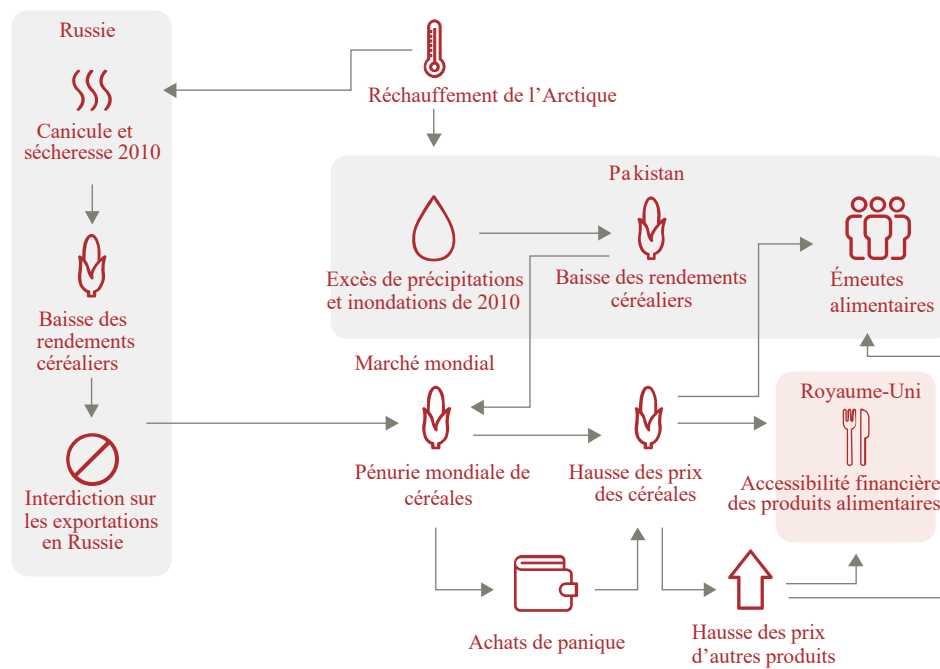
3.3. Impacts en cascade du changement climatique

Les « effets en cascade » du changement climatique sont la résultante de l'interconnexion et de l'interdépendance des systèmes naturels, sociaux et économiques. Les impacts se propagent par le biais des processus internationaux, tels que le commerce mondial, les flux financiers et les réseaux d'approvisionnement. (Acemoglu et al., 2012^[71]). Ces risques climatiques systémiques engendrent des difficultés particulières pour l'évaluation des risques. C'est notamment le cas lorsque les risques se transmettent de façon complexe entre les secteurs et par-delà les frontières des pays, ces mécanismes restant à ce jour mal compris (Koks, 2018^[72] ; Challinor et al., 2018^[73]).

Le Graphique 3.5 montre un exemple de ces chaînes complexes de transmission des risques, qui s'est produit en 2010 et a entraîné une hausse des prix alimentaires à l'échelle mondiale. En raison de sécheresses, les rendements céréaliers dans la Fédération de Russie (ci-après désignée « la Russie ») ont diminué, entraînant une pénurie de céréales sur les marchés internationaux (voir également l'encadré 4.1). Dans le même temps, les excès de précipitations au Pakistan ont provoqué une hausse des prix alimentaires mondiaux. Ces hausses de prix ont conduit à une augmentation de 50 % du recours aux banques alimentaires au Royaume-Uni. En Égypte, la hausse des prix des denrées alimentaires a été

l'étincelle d'émeutes qui ont conduit à un changement de gouvernement (Hildén et al., 2020^[74]). Autre exemple, les effets en cascade des risques d'inondation pourraient engendrer des risques économiques mondiaux du même ordre de grandeur que les dommages causés aux biens à l'intérieur et à l'extérieur de la région touchée, en raison des interdépendances des systèmes d'infrastructure (Koks, 2018^[72]).

Graphique 3.5. Exemple d'impacts transfrontaliers : sécheresses et prix des produits alimentaires



Source : (Hildén et al., 2020^[74])

Une cascade se produit à la suite d'une modification importante d'une ou de plusieurs variables clés d'un système. Ce phénomène induit un dépassement de « seuils multiples qui s'inscrivent dans l'espace, le temps et l'organisation sociale et dans les domaines écologiques, sociaux et économiques » (Kinzig et al., 2006^[75]). Il n'est pas facile de comprendre et d'analyser ces seuils, et encore moins d'agir sur eux. Le Rapport sur les risques mondiaux de 2018 reconnaissait qu'il demeurerait difficile pour l'humanité de gérer « les risques complexes dans des systèmes caractérisés par des boucles de rétroaction, des points de basculement et des relations de cause à effet opaques qui peuvent rendre les interventions problématiques » (Forum économique mondial, 2018^[76]).

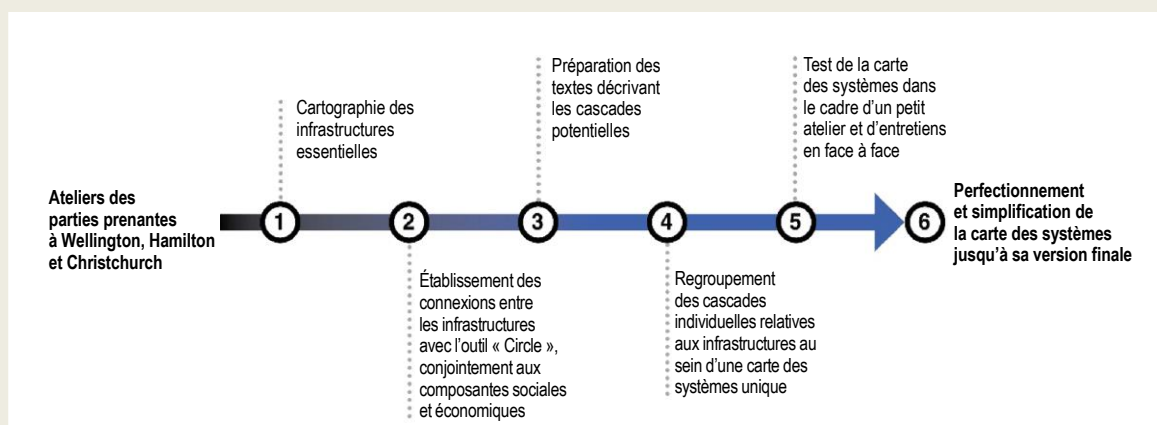
La compréhension des impacts en cascade du changement climatique a progressé suivant trois axes principaux : la résilience socio-écologique, la réduction des risques de catastrophe (UNDRR, 2015^[77]) et la dynamique des systèmes (Lawrence, Blackett et Cradock-Henry, 2020^[78]). En ce sens, les travaux sur les cascades couvrent un large éventail de sujets et de domaines thématiques, tels que la dynamique homme-écosystème, l'écologie, la recherche sur les aléas naturels et climatiques et la théorie des systèmes.

L'Encadré 3.3 analyse les impacts et conséquences potentiels des cascades en Nouvelle-Zélande. Il cherche à expliciter comment différents types d'aléas liés au changement climatique (par exemple, les phénomènes extrêmes, l'élévation du niveau de la mer ou les éléments « surprises » du système climatique) interviennent simultanément dans divers systèmes et domaines liés entre eux (Lawrence, Blackett et Cradock-Henry, 2020^[78]). Il met ainsi en évidence l'importance de comprendre les différents types d'aléas liés au climat ainsi que leurs conséquences potentielles dans le temps et l'espace, pour pouvoir ensuite examiner les impacts en cascade plus complexes du changement climatique.

Encadré 3.3. Les impacts en cascade du changement climatique et leurs conséquences – Étude de cas

Lawrence, Blackett et Cradock-Henry, (2020^[78]) ont étudié les impacts en cascade et leurs conséquences en Nouvelle-Zélande. Selon leur analyse, le cadre « systématise les interactions entre les cascades, comment les cascades affectent le système considéré et qui elles affectent, à quel endroit les interdépendances et les codépendances se produisent, et dans quelle mesure les impacts et leurs conséquences pourraient s'étendre à de multiples lieux géographiques, échelles et secteurs ». Le Graphique 3.6 résume le processus de collecte et d'analyse des données.

Graphique 3.6. Le processus de collecte et d'analyse des données



Source : (Lawrence, Blackett et Cradock-Henry, 2020^[78]).

Les aléas liés au changement climatique ont été caractérisés en typologies. Cela a permis de représenter les différents types d'aléa de façon systématique pour différentes régions. Les différents impacts étaient les suivants : i) émergence lente et continue (par ex. élévation du niveau de la mer et des nappes phréatiques) ; ii) augmentation de la variabilité climatique (par ex. augmentation de la fréquence et de la durée des sécheresses et des inondations) ; iii) extrêmes (par ex. ondes de tempête côtières et précipitations intenses) ; iv) impacts combinés (par ex. inondations côtières et fluviales) ; et v) éléments « surprises » (par ex. effets inconnus des changements atmosphériques). Les auteurs ont utilisé un cadre dynamique des systèmes pour examiner les conséquences de la combinaison de ces impacts, cette approche offrant une évaluation plus riche des risques que l'évaluation linéaire traditionnelle. Ils ont analysé les impacts produits sur les systèmes d'infrastructures hydrauliques et urbaines et sur les services financiers, et les conséquences des impacts en cascade du changement climatique sur la gouvernance.

L'étude montre qu'un examen attentif des effets combinés de divers types d'impacts liés entre eux peut aider à mieux comprendre la portée et l'ampleur des impacts du changement climatique. Elle examine les dépendances et les boucles de rétroaction entre les différents systèmes étudiés, à savoir les infrastructures hydrauliques et urbaines et les services financiers. Ce faisant, elle permet de « tester la robustesse » des hypothèses de risque. Les auteurs concluent que cette approche « peut faciliter l'élaboration de mesures d'adaptation qui soient flexibles mais aussi robustes dans différentes conditions futures, et ainsi éviter des franchissements de seuil face auxquels les communautés et les systèmes physiques seraient démunis » (voir également le chapitre 4). Par exemple, la compréhension des liens et des dépendances entre le secteur financier et les résultats en termes de bien-être humain peut faciliter l'élaboration de mesures d'adaptation plus transparentes. De manière plus générale, elle

peut servir de base à des modes de planification et de gouvernance adaptatifs qui rendent l'adaptation plus performante, en parallèle avec les politiques et les pratiques d'atténuation.

Note : « Les sites étaient les suivants : Hamilton, ville enclavée accolée à des zones rurales, qui présente des risques d'inondation et des besoins en matière de conservation et de tourisme ; Wellington, une capitale dont l'accès et la sortie sont limités par les contraintes géographiques et qui est entourée de côtes ; et Christchurch, ville construite autour d'estuaires et d'une côte de faible altitude, qui s'enfoncé depuis peu à cause des tremblements de terre et est confrontée à d'importants défis en termes d'inondations et d'eaux de ruissellement. »

Les sections qui suivent présentent trois nouvelles études distinctes. Elles se concentrent sur les impacts et, dans la mesure du possible, sur les effets en cascade potentiels de trois types d'aléas liés au climat : élévation du niveau de la mer, canicules et point de basculement résultant de l'effondrement de l'AMOC. En s'appuyant sur les travaux scientifiques les plus en pointe dans ces domaines, les études visent à faire la lumière sur le niveau des risques liés au climat ; à réfléchir à la manière dont ces connaissances scientifiques peuvent éclairer l'élaboration des politiques ; et à pointer les lacunes et les limites restantes.

3.4. Élévation du niveau de la mer : impacts et risques associés de pertes et de dommages dans les PEID

Les PEID forment un groupe hétérogène de territoires insulaires situés dans les Caraïbes, le Pacifique, l'Atlantique, l'océan Indien et la mer de Chine méridionale. Le Bureau de la Haute Représentante des Nations Unies pour les pays les moins avancés, les pays en développement sans littoral et les petits États insulaires en développement a répertorié 58 PEID (OHRLLS, 2021^[79]), qui sont les territoires pris en considération dans cette section.⁵

3.4.1. Bien que de natures variées, tous les PEID sont vulnérables

Les PEID présentent une palette diversifiée de tailles, de caractéristiques côtières, de cultures et de situations géographiques (Nurse et al., 2014^[50] ; Ratter, 2018^[80] ; OHRLLS, 2015^[81]). En termes de géographie physique, certains PEID sont des îles volcaniques faites de montagnes et de reliefs escarpés. D'autres sont des îles calcaires soulevées par des mouvements tectoniques, qui présentent généralement une surface tabulaire plate. D'autres encore sont des îles coralliennes composées de sédiments non consolidés provenant de récifs coralliens adjacents et dont l'altitude ne dépasse généralement pas 3 mètres (Nunn et al., 2016^[82] ; Ratter, 2018^[80]). Certains PEID sont des archipels composés de nombreuses petites îles dispersées dans l'océan, souvent très éloignées les unes des autres. Cependant, les PEID ne sont pas tous des petites îles. Ils comprennent également la Papouasie-Nouvelle-Guinée, Cuba, Haïti et la République dominicaine. Enfin, tous les PEID ne sont pas des territoires insulaires complets, puisqu'ils comprennent également des pays continentaux comme le Belize, le Guyana, le Suriname et la Guinée-Bissau. Les PEID sont également diversifiés sur le plan socio-économique. La population des îles varie entre environ 1 600 (Niue) et 11 millions de personnes (Cuba) (OCDE, 2018^[83]). Parallèlement, le revenu par habitant varie entre 2 300 USD dans les Îles Salomon et 60 000 USD à Singapour (Banque mondiale, 2021^[84]).

Une altitude faible, l'exposition aux aléas et la fragilité économique sont des facteurs qui accentuent la vulnérabilité des PEID

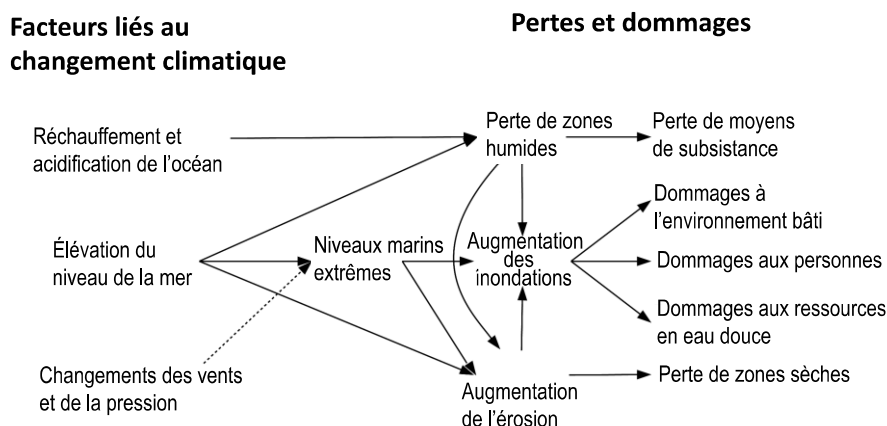
Indépendamment de cette diversité, tous les PEID sont vulnérables au changement climatique et en particulier à l'élévation du niveau de la mer et à ses conséquences (par ex. des ondes de tempête et des vagues plus hautes). Cette vulnérabilité est reconnue de longue date par les institutions internationales telles que le programme des Nations Unies Action 21, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC, 1992^[85]), l'Assemblée générale des Nations Unies et de nombreux documents de stratégie ultérieurs, dont l'Accord de Paris.

Cette reconnaissance procède de trois raisons principales (Leatherman et Beller-Simms, 1997^[86] ; Nurse et al., 2014^[50] ; Robinson, 2020^[87] ; OHRLLS, 2015^[81]):

- Premièrement, la seule zone habitable d'un PEID est la zone côtière de faible altitude. C'est le cas des atolls, où l'île entière est une zone côtière. Leur altitude est rarement supérieure à 2-3 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer (Woodroffe, 2008^[47]). Mais cela est également vrai des îles volcaniques à relief accentué, où la seule zone habitable est l'étroite frange côtière entourant l'île. Ces îles sont donc fortement menacées par la montée du niveau de la mer, les possibilités de relocalisation sur l'île étant de surcroît limitées (Nurse et al., 2014^[50] ; OHRLLS, 2015^[81]).
- Deuxièmement, les PEID sont frappés de manière disproportionnée par les catastrophes d'origine météorologique en raison de leur localisation. Étant situés dans l'océan, les PEID sont exposés à divers aléas liés au climat qui comprennent les interactions entre l'océan et l'atmosphère, telles que les cyclones tropicaux, les ondes de tempête, les vagues de vent et la grande variabilité climatique (due, par exemple, au phénomène El Niño-Oscillation australe, ENSO). Par exemple, le niveau moyen de la mer dans certains PEID du Pacifique peut s'élever de 20 à 30 cm pendant les épisodes La Niña (GIEC, 2014^[88]). En outre, de nombreux PEID sont situés à proximité de zones tectoniquement actives, et donc exposés aux tremblements de terre, aux éruptions volcaniques et aux tsunamis associés. En plus de cette difficulté, de nombreux PEID présentent une grande longueur de côte par unité de surface, qui majore le coût de la protection contre les aléas océaniques.
- Troisièmement, les PEID ont des économies fragiles et une gamme de ressources naturelles limitée. Les économies de nombre d'entre eux sont peu diversifiées et dépendent de quelques secteurs tels que le tourisme et la pêche, vulnérables aux chocs extérieurs. Par exemple, les exportations de poissons représentent près de 60 % du PIB national de Kiribati et des Îles Marshall. Parallèlement, le tourisme représente entre 50 et 80 % de l'économie nationale des Bahamas, des Maldives, des Palaos, de Vanuatu, des Seychelles, des Îles Cook et d'Antigua-et-Barbuda (OHRLLS, 2015^[81]). La faible résilience des économies de subsistance, l'isolement relatif et l'éloignement vis-à-vis des marchés ajoutent à cette fragilité socio-économique.

Face à ces facteurs de vulnérabilité, l'élévation du niveau de la mer expose les PEID à toute une série d'impacts (voir Graphique 3.7). Elle entraîne notamment une aggravation des inondations côtières, qui causent des dommages aux personnes, à leurs moyens de subsistance, à leurs biens matériels et à leurs ressources, notamment par le biais de la salinisation des eaux de surface et des eaux souterraines. L'élévation du niveau de la mer accentue également l'érosion côtière, entraînant la perte de sols. Si l'érosion entame les défenses côtières naturelles ou artificielles, elle risque aussi d'exacerber les inondations côtières. En outre, la montée des eaux peut entraîner un appauvrissement des écosystèmes côtiers et de la biodiversité associée, avec des effets négatifs sur les moyens de subsistance qui sont tributaires de ces écosystèmes. La disparition des écosystèmes aggrave encore les inondations et l'érosion côtières, car les écosystèmes tels que les coraux et les mangroves protègent les îles contre ces aléas.

Graphique 3.7. Principaux impacts de l'élévation du niveau de la mer et des facteurs climatiques associés sur les PEID



L'élévation du niveau de la mer n'est pas le seul facteur qui accentue les risques de pertes et de dommages induits par le changement climatique. Le réchauffement et l'acidification des océans sont d'autres facteurs climatiques de grande importance pour les PEID. Ces phénomènes menacent la survie des récifs coralliens qui protègent les PEID contre la montée du niveau de la mer et les phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer (Encadré 3.2).

Les risques sont aggravés par diverses autres pressions anthropiques qui s'exercent actuellement sur de nombreux PEID et sont liées au développement humain rapide, à l'urbanisation et au tourisme de masse. Elles comprennent la pollution de l'eau, la destruction des récifs par la pêche et la plongée et la conversion des mangroves pour d'autres modes d'utilisation des terres. Enfin, les risques climatiques et les impacts potentiels associés ne peuvent être compris qu'à la lumière des nombreuses réponses apportées ou susceptibles d'être apportées par l'homme pour gérer les risques d'élévation du niveau de la mer (voir chapitre 4, section 4.5).

3.4.2. Pertes et dommages

Inondations côtières

Les phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer, tels que les vagues et les ondes de tempête, peuvent provoquer l'inondation des côtes. L'ampleur de ces phénomènes est déterminée par la façon dont les niveaux marins extrêmes interagissent avec le profil de la côte. Celui-ci est déterminé par les barrières naturelles contre les inondations (par ex. les récifs coralliens et les mangroves) et les barrières artificielles (par ex. les digues et les murs côtiers). En l'absence de barrières, les niveaux marins extrêmes se déversent à l'intérieur des terres, situées plus bas. Lorsque des barrières existent, une inondation peut se produire si les vagues ou les ondes de tempête passent au-dessus de la barrière (c'est-à-dire si elles sont plus hautes que celle-ci), ou si elles la détruisent.

Les inondations côtières comptent parmi les catastrophes naturelles les plus dévastatrices. Elles provoquent des pertes humaines ; causent des dommages à la santé humaine, aux bâtiments, aux infrastructures, aux systèmes d'approvisionnement en eau douce et aux terres agricoles ; et interrompent les moyens de subsistance, les activités économiques et les chaînes d'approvisionnement (Kron, 2012^[89]). Pour les raisons précédemment évoquées, les PEID sont vulnérables à ces inondations. Les dommages cumulés causés par les cyclones tropicaux (dus aux niveaux marins extrêmes et aux vents extrêmes) entre 1990 et 2013 se sont élevés à plus de 10 % du PIB cumulé de neuf PEID. Ils ont même atteint de l'ordre de 40 % pour les Maldives, 50 % pour les Samoa, 80 % pour Saint-Kitts-et-Nevis et 90 % pour la

Grenade (PNUE, 2014^[90]). Dans l'ensemble, les PEID du Pacifique présentent le risque de catastrophe par habitant le plus élevé au monde (Edmonds et Noy, 2018^[91]).

Il n'existe pas d'évaluations comparatives spécifiques des risques futurs d'inondation côtière liés à l'élévation du niveau de la mer pour ces pays. Cependant, un certain nombre d'études globales ont produit des résultats au niveau national, y compris pour les PEID (Bisaro et al., 2019^[92]). Plusieurs messages généraux s'en dégagent. Premièrement, s'ils ne s'adaptent pas à la montée du niveau de la mer, les PEID subiront des impacts dévastateurs (Lincke et Hinkel, 2018^[93] ; Oppenheimer et al., 2019^[39] ; Wong et al., 2014^[94]). Deuxièmement, il est improbable, voire invraisemblable, que les PEID ne s'adaptent pas à ce phénomène (Hinkel et al., 2014^[95]) car l'adaptation côtière est une pratique largement répandue de nos jours. Qui plus est, elle a une longue histoire (Charlier, Chaineux et Morcos, 2005^[96]), y compris dans les PEID (Klöck et Nunn, 2019^[97]). Troisièmement, dans les zones densément peuplées, y compris celles des PEID, l'adaptation est généralement rentable. Autrement dit, le coût de l'adaptation est nettement inférieur au coût des pertes et des dommages subis en l'absence d'adaptation (Aerts et al., 2014^[98] ; Hallegatte et al., 2013^[99] ; Hinkel et al., 2018^[100] ; Lincke et Hinkel, 2018^[93] ; Oppenheimer et al., 2019^[39] ; Bisaro et al., 2019^[92]). Ce coût n'en demeure pas moins élevé et pourrait représenter vers la fin du siècle plusieurs points de pourcentage de PIB national pour de nombreux PEID. S'adapter pourrait donc être une option financièrement inabordable, ce qui souligne le risque existentiel que représente l'élévation du niveau de la mer pour les PEID (Wong et al., 2014^[94] ; Oppenheimer et al., 2019^[39]).

Érosion côtière et perte de sols

Indépendamment de l'élévation du niveau de la mer, l'érosion des sols côtiers est très étendue. Le phénomène d'érosion est influencé par divers facteurs naturels et anthropiques. Les facteurs naturels d'érosion côtière comprennent les courants, les marées, les vagues, les ondes de tempête et la variation naturelle du niveau relatif de la mer (due aux mouvements verticaux des terres). Il en résulte une perte permanente de sols, généralement associée à un gain de sols là où les sédiments d'érosion se déposent.

Les nombreuses modifications humaines apportées aux littoraux ont altéré ces processus naturels d'érosion, de transport de sédiments et d'accrétion sédimentaire. Il n'est pas possible d'attribuer l'érosion à des facteurs naturels ou humains précis. On estime cependant qu'environ 24 % du littoral sablonneux de la planète s'érodent, que 28 % subissent une accrétion (gain de sols) et que le reste est stable (Luijendijk et al., 2018^[101]).

L'élévation du niveau moyen de la mer devrait accentuer l'érosion. L'augmentation de la hauteur des ondes de tempête et des vagues produira le même effet en apportant davantage d'énergie sur le rivage (Ranasinghe, 2016^[102] ; Wong et al., 2014^[94]). Les travaux de modélisation au niveau mondial montrent qu'en termes absolus, les PEID des Caraïbes sont les plus touchés par le recul des côtes dû à l'érosion (en l'absence de mesures de protection). Le scénario RCP 8.5 prévoit que leur littoral reculera en moyenne de 300 mètres d'ici à 2100, 70 % étant dus à la montée du niveau de la mer (Vousdoukas et al., 2020^[103]).

Les processus d'érosion et d'accrétion des sols sont particulièrement prononcés dans les îles coralliennes. Les matériaux biogènes non consolidés provenant des récifs coralliens sont déposés par les courants et les vagues sur les îles coralliennes et leurs lagons (Duvat, 2018^[104] ; Holdaway, Ford et Owen, 2021^[105] ; Kench, 2012^[106] ; Kumar et al., 2018^[107]). Pour cette raison, on craint que la montée du niveau de la mer ne fasse rapidement disparaître les îles coralliennes.

Des études récentes ont quelque peu apaisé ces inquiétudes. Des travaux se sont intéressés à un grand nombre d'îles coralliennes des océans Pacifique et Indien, sous la forme de méta-analyses d'études de cas ou d'analyses d'images satellites. Ils ont montré qu'environ 90 % de ces îles étaient stables ou avaient vu leur superficie s'étendre au cours des dernières décennies de montée des eaux (Duvat, 2018^[104] ; Holdaway, Ford et Owen, 2021^[105]). Figurent parmi elles des îles situées dans des régions où le niveau de la mer a augmenté de plus de trois à quatre fois plus que la moyenne mondiale (McLean et Kench, 2015^[108]).

Ces études montrent également que divers facteurs contribuent aux changements observés sur les îles : courants naturels, variabilité et phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer notamment. En outre, l'homme modifie les processus de transport des sédiments en détruisant les récifs coralliens et en construisant des infrastructures côtières telles que digues, ports et brise-lames. L'élévation du niveau de la mer d'origine anthropique joue un rôle mineur (McLean et Kench, 2015^[108]).

En dépit de ces résultats encourageants, la montée du niveau de la mer pourrait bien menacer ces îles à l'avenir. Ceci souligne l'importance d'un aspect pour l'adaptation : les îles coralliennes sont capables de résister et de croître dans un contexte de montée des eaux si plusieurs conditions sont réunies. Premièrement, le récif doit produire suffisamment de sédiments. Deuxièmement, la dynamique naturelle de transport des sédiments doit être entretenue. Troisièmement, les îles doivent pouvoir être inondées de temps à autre, de manière à se développer verticalement grâce aux sédiments déposés par les inondations. Cette capacité d'adaptation est toutefois menacée par d'autres facteurs climatiques, examinés ci-après.

Disparition d'écosystèmes

Combinée à d'autres facteurs, l'élévation du niveau de la mer menace également les écosystèmes côtiers tels que les coraux et les mangroves. Ces écosystèmes protègent naturellement les côtes des niveaux marins extrêmes qui érodent les rivages et provoquent des inondations. Par conséquent, leur disparition exacerbe les impacts de l'érosion et des inondations.

Les récifs coralliens sont particulièrement importants pour protéger les côtes contre les vagues extrêmes – principal aléa côtier pour un grand nombre de PEID des océans Pacifique et Indien. La crête et le plat du récif dissipent l'énergie des vagues. Par conséquent, les vagues qui arrivent sur le littoral sont plus petites qu'à l'extérieur du récif. On estime qu'à l'échelle mondiale, en moyenne, les récifs coralliens réduisent l'énergie des vagues de 97 % (Ferrario et al., 2014^[109]). Cela signifie que la disparition des coraux a un effet désastreux sur ces littoraux en termes d'aggravation des inondations côtières. En outre, les coraux soutiennent les moyens de subsistance locaux de nombreuses manières. Par exemple, ce sont des attractions touristiques importantes (le tourisme étant le principal secteur économique de nombreux PEID). Ce sont également des habitats majeurs pour les pêcheries locales. La valeur des coraux pour le tourisme a été estimée à 36 milliards USD au niveau mondial (Spalding et al., 2017^[110]).

Le principal facteur climatique à l'origine de la disparition des coraux n'est pas la montée du niveau de la mer mais le réchauffement des océans. Dans une certaine mesure, les coraux peuvent même se développer verticalement si la mer monte. En revanche, des températures plus élevées que la normale peuvent entraîner un blanchissement massif des coraux puis leur dépérissement (Hughes et al., 2017^[111]). Les coraux du monde entier sont déjà gravement menacés par le niveau actuel du réchauffement climatique (Hughes et al., 2018^[112]). D'ici 2070, plus de 75 % des coraux devraient subir un blanchissement annuel sévère, même avec des niveaux de réchauffement climatique intermédiaires (c'est-à-dire le scénario RCP 4.5) (van Hooidonk et al., 2016^[113]). L'acidification des océans aggrave encore les menaces qui pèsent sur les coraux. Elle peut en effet réduire l'efficacité avec laquelle les coraux construisent leurs squelettes de calcaire. Cependant, les effets à long terme de ce processus commencent seulement à être compris (Kroeker et al., 2013^[114]).

La disparition des coraux augmente considérablement les risques d'érosion et d'inondation. Les récifs en mauvaise santé ou éteints ne peuvent pas produire les sédiments nécessaires à la croissance des îles coralliennes et à leur adaptation à la montée des eaux. Comme les coraux, les mangroves protègent le littoral des PEID contre les phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer. Elles fournissent un certain nombre de services écosystémiques importants, tels que le soutien à la pêche et le piégeage du carbone. De manière générale, les mangroves peuvent s'adapter à une élévation importante du niveau de la mer en migrant vers l'intérieur des terres et en remontant le long de la pente côtière si l'espace pour les

accueillir (espace d'accommodation) et l'apport de sédiments sont suffisants (Lovelock et al., 2015^[115] ; Schuerch et al., 2018^[116]).

L'espace d'accommodation fait référence au processus de migration vers l'intérieur des terres qui n'est pas empêché par des pentes côtières abruptes ou des infrastructures humaines (par ex. digues, routes, établissements humains, etc.). Cependant, la zone côtière est étroite et/ou utilisée de manière intensive par l'homme (Sasmito et al., 2015^[117]), ce qui limite souvent l'étendue des espaces d'accommodation dans les PEID. De même, le volume des sédiments dont les mangroves ont besoin pour s'étendre vers le haut lors de la montée des eaux est fortement limité. Les pressions anthropiques telles que l'endiguement des cours d'eau, par exemple, apportent des sédiments sur la côte. Ce processus devrait s'aggraver au cours du XXI^e siècle (Dunn et al., 2019^[118]). En 2015, une analyse comparative a été menée sur des sites de mangrove, dont certains situés dans les PEID du bassin Indo-Pacifique. Dans environ 70 % des sites étudiés, l'absence de sédiments limite déjà la capacité des mangroves à s'adapter à l'élévation actuelle du niveau de la mer (Lovelock et al., 2015^[115]).

Disparition de ressources en eau douce

De nombreux PEID sont d'ores et déjà confrontés à des ressources en eau douce limitées et à la montée des eaux. Les phénomènes extrêmes liés au niveau de la mer et l'aggravation des inondations et de l'érosion côtière qui en résulte exercent des pressions supplémentaires sur ces limites (Nurse et al., 2014^[50]). De nombreuses études observent que l'élévation du niveau de la mer à elle seule ne menace pas systématiquement les lentilles d'eau douce. Deux conditions permettent de se prémunir contre cette menace. Premièrement, il doit y avoir un espace d'accommodation vertical suffisant pour permettre aux lentilles d'eau douce de se déplacer vers le haut avec la montée des eaux. Deuxièmement, l'érosion côtière ne doit pas réduire la taille des îles (Falkland et White, 2020^[119]).

L'élévation du niveau de la mer a toutefois des effets négatifs sur la disponibilité de l'eau douce dans les PEID lorsqu'elle est responsable d'une augmentation de la fréquence des inondations des îles par les ondes de tempête ou les vagues. C'est notamment le cas pour les îles coralliennes, où la lentille d'eau douce n'a que quelques mètres d'épaisseur. Avec une lentille aussi fine, l'intrusion par le haut de petites quantités d'eau salée peut rendre l'eau douce impropre à la consommation pendant des mois, voire des années (Gingerich, Voss et Johnson, 2017^[120] ; Holding et Allen, 2015^[121]).

Avec la montée du niveau de la mer, les inondations par les vagues deviendront plus intenses et plus fréquentes. Cela augmentera le délai de reconstitution des lentilles d'eau douce et pourrait, in fine, entraîner une situation dans laquelle l'eau douce ne sera plus potable. Selon certaines études, le risque que l'eau potable disparaisse est inévitable dans certains cas. Storlazzi et al. (2018^[122]) indiquent que les îles coralliennes de Roi-Namur en République des Îles Marshall perdront leur eau potable en 2030-40 dans le scénario RCP8.5, et en 2055-65 dans le scénario RCP4.5. Ils en concluent que « la plupart des atolls seront inhabitables d'ici le milieu du XXI^e siècle ».

Les conclusions de Storlazzi et al. (2018^[122]) font fi de l'adaptation humaine. De nombreux atolls sont déjà fortement menacés par le stress hydrique, raison pour laquelle ils ont recours à la désalinisation de l'eau de mer pour leurs besoins en eau potable, ou à l'importation et l'utilisation des eaux souterraines saumâtres pour leurs besoins en eau non potable (Falkland et White, 2020^[119]). Si la désalinisation est techniquement possible dans la plupart des cas, c'est une opération coûteuse et technologiquement complexe. Elle nécessite des conditions d'exploitation et d'entretien adéquates (Falkland et White, 2020^[119]).

3.5. Quantification des impacts du changement climatique et attribution des phénomènes extrêmes

Les coûts des phénomènes météorologiques extrêmes vont croissant (Barthel et Neumayer, 2012^[123] ; Smith et Katz, 2013^[124] ; Smith et Matthews, 2015^[125] ; NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI), 2021^[126]). Dans le discours public, des exemples de ces coûts croissants, tels que la multiplication des « catastrophes se chiffrant en milliards de dollars » aux États-Unis, sont fréquemment cités en tant que preuve d'un changement climatique anthropique. Pour beaucoup, ces anecdotes témoignent des « impacts réels du changement climatique ». Toutefois, de telles affirmations sont peut-être prématurées. D'autres facteurs non liés au changement climatique contribuent également à l'augmentation des dommages causés par les phénomènes naturels – citons notamment l'exposition croissante des actifs physiques et l'amélioration de la notification des coûts liés aux phénomènes naturels (Smith et Katz, 2013^[124]). Une évaluation plus complète des coûts du changement climatique d'origine anthropique nécessiterait en fait de dissocier le rôle de ces différents facteurs. Il convient en particulier de déterminer le rôle de l'exposition et de la vulnérabilité dans le contexte du phénomène extrême considéré. Il faut également isoler le rôle du changement climatique dans le phénomène extrême lui-même.

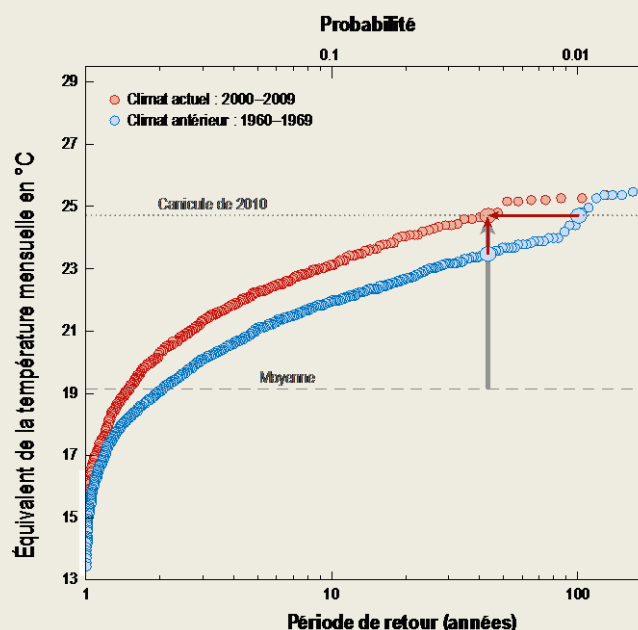
Alors que, des décennies durant, les scientifiques eux-mêmes ont jugé cette tâche impossible, l'avènement de la science de l'attribution des phénomènes extrêmes offre une méthode quantitative pour déterminer si et, le cas échéant, dans quelle mesure le changement climatique est responsable de l'aggravation des impacts des différents phénomènes météorologiques extrêmes actuels. L'attribution des phénomènes extrêmes représente donc une passerelle conceptuelle essentielle. Elle établit un lien entre les phénomènes météorologiques extrêmes actuels et la hausse à long terme des températures moyennes mondiales due au changement climatique anthropique (voir Encadré 3.4).

Encadré 3.4. Qu'est-ce que l'attribution des phénomènes extrêmes ?

Il existe de plus en plus d'études consacrées à l'attribution des phénomènes. Ce corpus grandissant aide à mieux comprendre l'impact du changement climatique sur les systèmes naturels et humains au niveau local. Il indique également comment des niveaux plus élevés d'émissions de gaz à effet de serre, combinés à d'autres polluants et à une surface terrestre en mutation, modifient la probabilité et l'intensité des phénomènes extrêmes (Stott et al., 2015^[127] ; Otto, 2017^[128]). Le changement climatique influe non seulement sur la température globale de la planète, mais aussi sur la circulation atmosphérique (Vautard et al., 2016^[129]). Il peut donc affecter les phénomènes météorologiques extrêmes de trois manières différentes : i) en augmentant la probabilité qu'un phénomène se produise ; ii) en diminuant la probabilité qu'un phénomène se produise ; ou iii) en n'ayant pas d'effet sur la probabilité qu'un phénomène se produise.

L'approche la plus couramment utilisée, illustrée par le Graphique 3.8, s'appuie sur l'exemple de la canicule russe de 2010 (Otto et al., 2012^[130]). La première étape consiste à évaluer la probabilité que l'intensité observée du phénomène extrême en question (ligne horizontale pointillée) se produise dans le climat actuel (points rouges), tous les facteurs (non climatiques) anthropiques étant pris en compte. On la compare ensuite à la probabilité d'occurrence d'un tel phénomène dans un monde sans changement climatique anthropique (points bleus). Cela permet d'isoler et quantifier l'effet du changement climatique (flèche horizontale) sur la probabilité d'occurrence d'un phénomène d'une ampleur déterminée, ainsi que le changement d'intensité d'un phénomène d'une probabilité observée (petite flèche verticale).

Graphique 3.8. Analyse d'attribution de la canicule russe de 2010



Note : Période de retour de températures moyennes mensuelles extrêmement élevées en Russie occidentale dans le climat actuel (en rouge) et dans un climat antérieur (en bleu). La ligne tiretée indique les températures moyennes mensuelles, et la ligne pointillée l'ampleur de la canicule en 2010. La flèche grise montre l'écart de l'ampleur par rapport à la moyenne, et la flèche verticale rouge décrit le rôle du changement climatique dans cet écart. La flèche horizontale rouge représente la hausse de la fréquence de canicules du type de celle de 2010 provoquée par le changement climatique anthropique.

Source : (Otto, 2017^[128]).

Pour le climat actuel, les observations du temps et du climat peuvent aider à estimer la probabilité d'un phénomène. Il n'existe en revanche pas d'observations d'un monde hypothétique et contrefactuel sans changement climatique anthropique. En outre, seul le temps qu'il a fait peut être observé ; il n'est pas possible d'observer toutes les conditions météorologiques possibles dans un climat donné. L'attribution des phénomènes repose donc sur des modèles climatiques capables de simuler les conditions météorologiques possibles, y compris le phénomène extrême considéré, dans une région et une saison déterminées avec suffisamment de précision pour tirer des conclusions sur le rôle du changement climatique. Les premières études à avoir appliqué l'approche d'attribution probabiliste des phénomènes utilisaient un seul modèle climatique (Stott, Stone et Allen, 2004^[131]) ; par conséquent, leurs résultats dépendaient fortement de la fiabilité de ce modèle (Bellprat et Doblas-Reyes, 2016^[132] ; Otto et al., 2020^[133]). Une approche plus robuste a été mise au point depuis, combinant analyses statistiques fondées sur l'observation et modèles multiples de complexité variable. Un tout nouveau domaine a ainsi vu le jour en climatologie, et les méthodes s'améliorent constamment (Philip et al., 2020^[134] ; van Oldenborgh et al., 2021^[135]).

Deux aspects de la méthodologie sont importants. Premièrement, la définition des phénomènes extrêmes est un élément crucial de l'analyse, qui en détermine le résultat. Dans l'approche la plus couramment utilisée, le phénomène est toujours défini comme un type de temps qui conduit à un impact. Il peut s'agir, par exemple, de précipitations extrêmes qui dépassent un certain seuil dans une zone ou lors d'une saison particulière, et provoquent des inondations. D'autres méthodologies privilégient les approches fortement conditionnées (ou narratives), qui ne sont pas probabilistes et adoptent une définition beaucoup plus étroite des phénomènes [(Shepherd et al., 2018^[136] ; Hegdahl et al., 2020^[137]) et encadré 4.2]. Deuxièmement, l'attribution des phénomènes extrêmes nécessite de

disposer de modèles climatiques qui simulent de manière réaliste le type de phénomène considéré. Par exemple, on ne pourra pas évaluer les impacts des tornades ou des tempêtes de grêle extrêmes tant que les modèles de génération actuelle ne parviendront pas à simuler valablement les processus physiques correspondants.

En outre, les meilleures données disponibles sur l'impact d'une catégorie de conditions météorologiques extrêmes déterminée dans une région déterminée se résument souvent à un unique point de donnée – les impacts du phénomène en question tel qu'il a été récemment observé. Par conséquent, les énoncés d'attribution s'inscrivent dans les limites d'une seule observation d'impact. Dans le contexte de l'élaboration d'énoncés d'attribution, les scientifiques ont une compréhension limitée de la forme spécifique de la relation aléa-impact. En d'autres termes, ils sont souvent incapables de déterminer quantitativement si un phénomène un peu moins intense aurait eu un peu moins d'impacts, voire aucun impact du tout. Les modèles climatiques sont capables d'examiner la probabilité d'observer des caractéristiques météorologiques identiques ou pires que le phénomène récemment observé dont on connaît l'impact. Ils peuvent quantifier la fraction de cette probabilité qui ne se serait pas produite dans un climat préindustriel. De cette façon, la méthodologie d'attribution contourne la nécessité de résoudre d'autres aspects précis de la relation aléa-impact. Au lieu de cela, elle articule le changement attribuable estimé des impacts autour de l'unique point de donnée observé. Il faut avoir la certitude que ce point de donnée concerne directement les communautés qui ont été touchées par le phénomène (Frame et al., 2020^[138] ; Clarke, E. L. Otto et Jones, 2021^[139]).

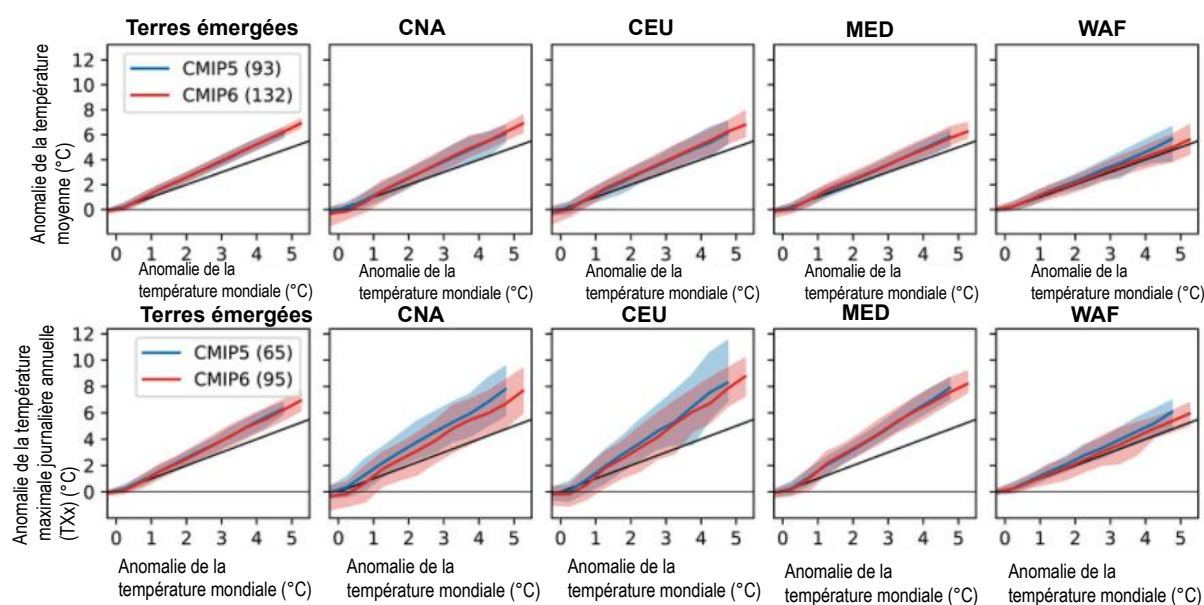
La science de l'attribution des phénomènes extrêmes a fait l'objet d'examens approfondis par les pairs. De l'avis de certains, les scientifiques se montrent trop confiants dans leurs énoncés d'attribution (Bellprat et Doblas-Reyes, 2016^[132]). Pour d'autres, ils sont trop prudents (Lloyd et Oreskes, 2018^[140] ; Lloyd et al., 2021^[141]). Dans le milieu de l'attribution probabiliste, ces examens ont conduit assez rapidement à l'élaboration de méthodes d'estimation de l'évolution des aléas transparentes et plus robustes. Ces méthodes sont présentées en détail dans van Oldenborgh et al. (2021^[135]). Elles impliquent une réflexion attentive sur la définition des phénomènes ; une évaluation normalisée de l'opportunité d'inclure des modèles climatiques dans une étude ; et une évaluation des incertitudes structurelles des modèles climatiques et de celles dues aux contraintes des données d'observation.

3.5.1. Caractéristiques robustes de l'aggravation des conditions météorologiques extrêmes due au changement climatique

La science de l'attribution a permis d'identifier de nombreuses caractéristiques robustes de l'aggravation des conditions météorologiques extrêmes due au changement climatique (malgré les difficultés méthodologiques et les incertitudes évoquées respectivement dans l'Encadré 3.4 et l'Encadré 3.5). Tout d'abord, on peut affirmer avec une grande certitude que la fréquence et la gravité des phénomènes extrêmes liés à la chaleur augmentent, et ce plus rapidement de plusieurs ordres de grandeur que tout autre type de phénomène météorologique extrême (Fischer et Knutti, 2015^[142]), et que les canicules marines connaissent des changements encore plus rapides que les canicules terrestres (Oliver et al., 2017^[143] ; Frölicher, Fischer et Gruber, 2018^[144])⁶. Il est important de le souligner, car la gestion des risques futurs sera sensiblement différente selon qu'une catégorie de phénomènes météorologiques extrêmes deviendra *seulement* deux fois plus probable en raison des niveaux de réchauffement actuels (par exemple, les inondations au Royaume-Uni (Otto et al., 2018^[145])), ou des centaines de fois plus fréquente (comme les canicules sous les tropiques (Perkins-Kirkpatrick et Gibson, 2017^[146])). Cela est d'autant plus vrai que les évaluations des risques au niveau national sont réalisées principalement par le secteur des assurances, qui n'assure généralement pas les pertes liées à la chaleur, ignorant ainsi la catégorie d'extrêmes pour laquelle le changement climatique a le plus d'impacts.

Deuxièmement, les taux d'intensification prévus sont assortis d'un niveau de confiance élevé, tant pour les canicules extrêmes que pour les précipitations extrêmes. Ces taux de changement sont correctement simulés dans les modèles climatiques, et les processus physiques qui les sous-tendent sont également bien compris. Comme le montre le Graphique 3.9, les projections futures des températures moyennes et des températures élevées extrêmes peuvent être exprimées sous la forme d'une simple réponse linéaire à l'augmentation anthropique du réchauffement moyen de la planète. Sur les terres émergées, on constate que les températures moyennes augmentent plus rapidement que la moyenne mondiale, processus qui est lié à la différence de la vitesse du réchauffement prévu entre les terres et les océans (Joshi et al., 2007^[147]) et que l'on attribue en grande partie à la dynamique atmosphérique (Joshi et al., 2007^[147] ; Byrne et O'Gorman, 2013^[148] ; Byrne et O'Gorman, 2018^[149]). Dans le cas des températures élevées extrêmes (rangée inférieure du Graphique 3.9.), il existe un facteur d'amplification supplémentaire pour les régions à humidité limitée comme la Méditerranée (Seneviratne et al., 2016^[150] ; Vogel et al., 2017^[151] ; Vogel, Zscheischler et Seneviratne, 2018^[152]). Par exemple, (Vautard et al., 2020^[153]) observent « [qu'] en l'absence de changement climatique anthropique », des canicules aussi exceptionnelles que celles qui ont frappé l'Europe en juin et juillet 2019 auraient « été moins chaudes d'environ 1.5 à 3 degrés ». La synthèse des données probantes fait ressortir l'intensification des températures élevées extrêmes à des valeurs comprises entre 1 et 3 degrés par degré de réchauffement climatique – il est cependant précisé que cette fourchette est supposée représenter l'ensemble des régions terrestres peuplées, et que la fourchette d'incertitude pour les régions individuelles est sans doute plus étroite.

Graphique 3.9. Changement des températures locales par degré de réchauffement climatique



Note : Changements prévus des températures moyennes (rangée supérieure) et des températures maximales journalières annuelles (rangée inférieure) en fonction de différents scénarios de réchauffement futur, pour plusieurs régions (CNA = centre de l'Amérique du Nord ; CEU = Europe centrale ; MED = Méditerranée ; WAF = Afrique de l'Ouest). Les résultats sont présentés sous forme de changements par rapport aux hausses correspondantes de la température moyenne mondiale ; la ligne noire indique une relation de 1:1.

Source : (Seneviratne et Hauser, 2020^[154])

En ce qui concerne les processus physiques à l'origine de l'intensification des précipitations extrêmes, il y a plus d'humidité dans une atmosphère plus chaude ; il en résulte une augmentation de l'intensité de tous les épisodes de précipitations, à considérer que la circulation atmosphérique demeure inchangée par ailleurs (Allen et Ingram, 2002^[155] ; Allan et Soden, 2008^[156]). Cependant, d'autres facteurs physiques non examinés en détail ici peuvent réduire (Pendergrass, 2018^[157]) ou intensifier les phénomènes (Meredith

et al., 2015^[158] ; Meredith et al., 2015^[159] ; Prein et al., 2015^[160] ; Prein et al., 2016^[161] ; Fowler et al., 2021^[162]). Les taux d'intensification des précipitations extrêmes s'établissent dans une fourchette de 5 % à 15 % par degré de réchauffement climatique ; il existe bien sûr des différences selon les régions et la durée des phénomènes considérés (Westra et al., 2014^[163] ; Prein et al., 2016^[161] ; Hodnebrog et al., 2019^[164]) ou le degré plus ou moins extrême des phénomènes en question (Fischer et Knutti, 2015^[142] ; Kharin et al., 2018^[165] ; Pendergrass, 2018^[157]).

Troisièmement, plusieurs études d'attribution (Freychet et al., 2019^[166]) ont montré que dans de vastes pans de l'Asie (en particulier l'Inde) et certaines parties des États-Unis, le signal GES d'intensification des canicules est contenu en raison de l'effet refroidissant des émissions d'aérosols associées à la pollution atmosphérique locale et/ou à l'irrigation à grande échelle. Par conséquent, il existe une forte probabilité que les efforts déployés pour réduire la pollution atmosphérique ou modifier les pratiques d'irrigation dans le futur affectent ces effets d'amortissement temporaires, au risque d'entraîner une aggravation potentiellement soudaine de la gravité relative des canicules dans ces régions. Ainsi, et cela peut paraître paradoxal, l'un des effets de la réduction de la combustion des combustibles fossiles pourrait être une hausse des températures dans certaines parties du monde, dans la mesure où l'effet refroidissant des aérosols atmosphériques se dissiperait rapidement.

Quatrièmement, de nombreux phénomènes extrêmes multifactoriels (comme le stress thermique, la sécheresse agricole ou les feux de végétation) donnent lieu à des énoncés d'attribution plus incertains que les phénomènes extrêmes unifactoriels. Cela tient en partie au manque d'observations à haute résolution et de qualité élevée pour les variables autres que les précipitations et la température. Les modèles climatiques et les outils d'attribution des phénomènes peuvent néanmoins identifier et décomposer de manière sélective l'importance *relative* des variables individuelles pour les signaux de changement, qui sont intrinsèquement complexes (Uhe et al., 2017^[167] ; Philip et al., 2018^[168] ; Kew et al., 2021^[169]). Par exemple, il est rare que les déficits de précipitations cumulés sur plusieurs mois ou plusieurs années montrent des signes de changement en réponse aux niveaux de réchauffement climatique actuels (Otto et al., 2015^[170]), sauf dans certaines régions spécifiques (Otto et al., 2018^[171]). Et bien que cette absence de changement dans la fréquence des années de faible pluviosité ait également été constatée pour la Californie, (Diffenbaugh, Swain et Touma, 2015^[172]) ont démontré que la hausse simultanée des températures était le signe que les risques globaux de sécheresse continuaient bel et bien à augmenter. En outre, depuis 2010, le Chili est touché par une « méga-sécheresse », nom donné à un phénomène de sécheresse exceptionnel qui frappe les zones les plus peuplées du pays, et qui est sans précédent dans les relevés historiques et/ou instrumentaux ou les registres paléoclimatiques couvrant les 1000 dernières années. Des études d'attribution montrent qu'environ 25 % du déficit de précipitations observé de 2010 à 2015 peut être attribué au changement climatique anthropique et que ce facteur persistera à l'avenir, favorisant le retour de ces phénomènes et accentuant l'aridification des zones centrales et méridionales du pays (CR2, 2015^[173]).

Encadré 3.5. Sources connues d'incertitudes dans les études d'attribution des phénomènes

Incertitudes entourant la quantification des impacts de différentes catégories de conditions météorologiques extrêmes

Pour mieux comprendre les pertes et les dommages causés par le changement climatique, il est nécessaire de mieux quantifier les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes. Toutefois, la surveillance et la notification systématique des impacts climatiques associés à différentes catégories de conditions météorologiques extrêmes – et a fortiori des expositions et des vulnérabilités sous-jacentes – sont peu fréquentes et disparates entre pays pauvres et pays riches (Guha-Sapir, Hargitt et Hoyois, 2004^[174] ; Visser, Petersen et Ligtoet, 2014^[175] ; Noy, 2016^[176] ; Noy et duPont IV, 2018^[177] ; Tschumi et Zscheischler, 2019^[178]). Le chapitre 2 (section 2.2.1) présente succinctement les différents

types d'incertitude auxquels on se heurte lorsque l'on mesure les impacts de différentes catégories de conditions climatiques extrêmes, à savoir les inondations, les feux de végétation, les canicules et les sécheresses.

Différents aspects de l'incertitude de l'attribution pour différentes catégories de conditions météorologiques extrêmes

La contrainte limitative la plus importante qui se pose lorsque l'on cherche à quantifier le rôle du changement climatique anthropique dans un phénomène météorologique extrême est de savoir s'il existe des modèles climatiques pouvant simuler utilement les facteurs physiques du phénomène considéré (Encadré 3.4). Les spécialistes de la science de l'attribution prennent en considération d'autres facteurs pour les catégories de phénomènes pour lesquels les modèles climatiques donnent des résultats très fiables (par exemple les épisodes pluvieux extrêmes à grande échelle ou les canicules terrestres) (van Oldenborgh et al., 2021^[135]).

L'une des sources d'incertitude concerne le choix de l'échelle spatiale et temporelle à utiliser pour définir le phénomène extrême en question (Angélil et al., 2014^[179]). En général, les spécialistes de l'attribution choisissent cette échelle en isolant les impacts les plus significatifs du phénomène, par exemple le lieu et le moment où les anomalies de température ont été les plus extrêmes. Ils sont obligés de faire un choix, tout en sachant qu'un choix différent modifierait peut-être la gravité du phénomène observé lui-même, ainsi que l'influence estimée du changement climatique sur le phénomène (Cattiaux et Ribes, 2018^[180]). Cette variation potentielle ne correspond pas à une différence réelle de la contribution du changement climatique au renforcement de l'intensité de la canicule considérée. Elle s'explique plutôt par le fait que pour traduire l'intensification en « changement de fréquence de récurrence », on examine la mesure dans laquelle un signal déterminé a émergé de la variabilité de référence, et que le bruit associé aux extrêmes de chaleur augmente à des échelles spatio-temporelles plus petites. De fait, pour les extrêmes liés à la chaleur, la réanalyse systématique d'un même épisode de canicule à des échelles spatiales ou temporelles de plus en plus fines réduit généralement la grandeur de toute mesure d'attribution fondée sur la *fréquence* (Angélil et al., 2014^[179]). Une étude montre par exemple que le changement climatique a rendu les chaleurs extrêmes enregistrées en Europe en 2018 entre 2 et 100 fois plus probables, en fonction des choix d'échelles spatiales et temporelles utilisées pour analyser le phénomène (Leach et al., 2020^[181]).

Pour les extrêmes de précipitations, les caractéristiques topographiques et d'autres effets locaux sont tels que des signaux d'évolution future des précipitations opposés peuvent également être rencontrés dans des endroits proches (Caloiero, 2014^[182]). De même, l'examen des changements des précipitations hivernales et estivales pour un même site peut aboutir à des signaux de changement climatique opposés (Guillod et al., 2017^[183]). Par conséquent, il existe un potentiel important d'annulation des signaux de changement climatique, par ailleurs robustes, lorsqu'on examine les extrêmes de précipitations sur des échelles spatiales ou temporelles de plus en plus grandes. C'est pourquoi toute tentative de quantifier les signaux d'assèchement ou d'humidification dans le contexte du changement climatique exige un traitement minutieux des caractéristiques climatologiques des précipitations dans la région considérée.

Ces éléments conduisent à formuler trois règles générales pour l'analyse. Choisir les échelles spatio-temporelles qui cadrent le plus étroitement possible avec les impacts implique d'analyser les précipitations extrêmes sur des périodes courtes (jours) et des échelles spatiales réduites (villes à régions). Les analyses des canicules utilisent des échelles spatiales diverses (villes à continents), mais souvent de petites échelles temporelles (jours à semaines). Enfin, les analyses des sécheresses se réfèrent à de grandes échelles spatiales (régions à continents) et temporelles (mois à années).

Note : Le chapitre 2 examine les incertitudes de façon plus détaillée.

3.5.2. Émergence attendue de changements sans précédent dans les extrêmes de chaleur

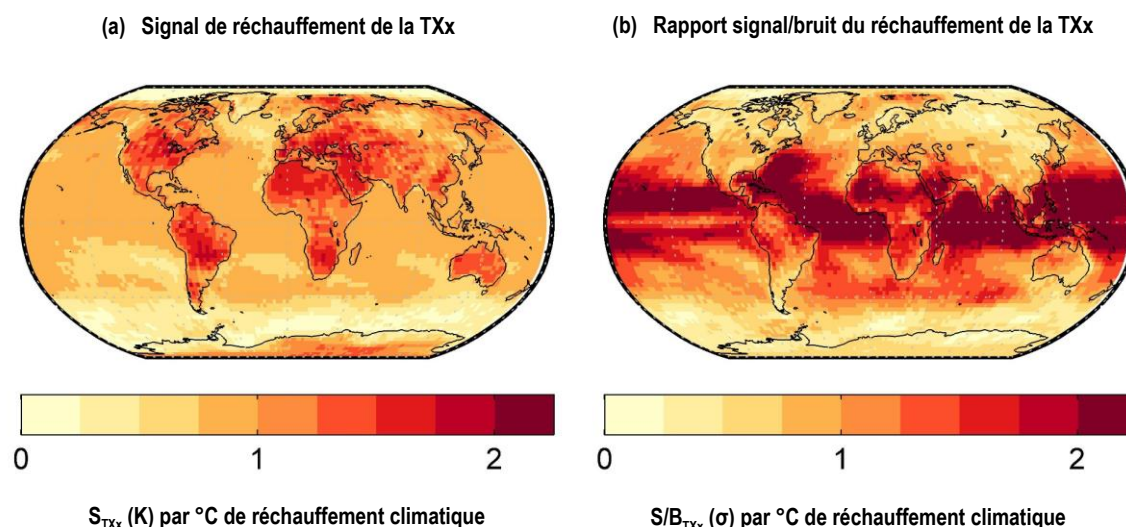
On se demande fréquemment à quel moment certaines régions du monde pourraient devenir « inhabitables » en raison de l'évolution future des chaleurs extrêmes ou du stress thermique. Cette section cherche à mettre en évidence la configuration et la vitesse relative des changements associés à l'évolution de la distribution de la journée la plus chaude de l'année pour différentes régions du monde. Elle tente également d'expliquer pourquoi l'on ne pourra jamais effectuer de désagrégation simple et binaire des régions futures sur la base des lieux où les humains peuvent ou ne peuvent pas continuer à vivre.

Le changement relatif de la journée la plus chaude de l'année en tant qu'indicateur indirect des températures élevées extrêmes

Dans la partie (a) du Graphique 3.10, le signal du changement relatif de la journée la plus chaude de l'année (TXx) est utilisé comme indicateur indirect des températures élevées extrêmes. Ces changements sont normalisés pour montrer le signal de changement par degré de réchauffement climatique moyen (dans le scénario RCP 8.5 à émissions élevées). La TXx a fait l'objet d'analyses étendues par le passé (Sillmann et al., 2013^[184] ; King et al., 2015^[185] ; King et al., 2016^[186] ; Harrington et al., 2018^[187]). Son profil est également en adéquation avec les changements des canicules extrêmes sur des échelles temporelles de plusieurs jours (Perkins et Alexander, 2013^[188] ; Cowan et al., 2014^[189] ; Russo, Sillmann et Fischer, 2015^[190] ; Russo et al., 2016^[191] ; Angélil et al., 2017^[192]).

Les résultats montrent un signal clair de réchauffement de la TXx sur les terres émergées. Cette évolution dépasse le changement correspondant de la température moyenne mondiale d'un facteur pouvant atteindre 1.8 dans certains endroits. Comme on l'a expliqué précédemment, ces processus de changement sont très bien compris. Ils s'expliquent principalement par deux types de différence. Premièrement, ils sont liés aux facteurs qui déterminent les taux de réchauffement moyen comparés sur les terres émergées et sur les océans (Joshi et al., 2007^[147]). Deuxièmement, ils sont liés à l'accélération supplémentaire observée dans les zones continentales à humidité limitée, où les journées les plus chaudes de l'année s'intensifient encore sous l'effet des mécanismes de rétroaction de l'humidité du sol (Vogel et al., 2017^[151]).

Graphique 3.10. La « nouvelle norme » : chaleur extrême future et changements vis-à-vis des valeurs antérieures



Note : (a) Configurations spatiales médianes multi-modèles de la variation de la TXx par °C de réchauffement dans les scénarios de réchauffement futur. (b) Identique à la partie (a), mais pour les configurations spatiales des rapports signal/bruit (rapports S/B) de la TXx. Les changements futurs de la TXx sont normalisés sur la base des variations d'une année sur l'autre figurant dans les relevés historiques (rapports S/B). Un rapport S/B de 1 signifie que la hausse prévue des températures de la journée la plus chaude de l'année sera égale à l'écart type des variations d'une année sur l'autre de la TXx dans le climat actuel.

Une nouvelle journée la plus chaude de l'année « moyenne », fondée sur les variations d'une année sur l'autre historiques

Dans la partie (b) du Graphique 3.10., les changements futurs de la TXx sont normalisés sur la base des variations d'une année sur l'autre figurant dans les relevés historiques. Plus précisément, le signal de réchauffement de la TXx est divisé par l'écart type local de la TXx. Ce calcul est effectué à partir des données historiques de toutes les années du XX^e siècle, après élimination linéaire de la tendance (ce ratio est désigné ci-après « rapport signal/bruit » ou S/B). Un rapport S/B de 1 signifie que le changement futur (hausse) de la température moyenne de la journée la plus chaude de l'année est identique à l'écart type de la température de la journée la plus chaude de l'année dans le climat actuel. En d'autres termes, la nouvelle journée la plus chaude « moyenne » aurait été, par le passé, un événement survenant environ une année sur six. Sur cette base, on peut procéder à une évaluation comparable à l'échelle mondiale, qui permette de déterminer si les changements futurs dans les extrêmes de chaleur sont *inhabituels* par rapport à la plage des expériences communes à des lieux individuels (et aux écosystèmes ou sociétés qui s'y trouvent) (Hawkins et Sutton, 2012^[193] ; Frame et al., 2017^[194] ; Hawkins et al., 2020^[195]).

De ce point de vue, la partie (b) du Graphique 3.10. révèle que les océans tropicaux sont les zones qui subissent les changements *relatifs* des températures élevées extrêmes de loin les plus rapides. Viennent ensuite les régions arides de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, puis les autres régions terrestres tropicales. Ces tendances cadrent avec d'autres résultats qui montrent que les canicules marines deviennent déjà plus intenses et plus fréquentes. La rapidité de ces changements est sans égale si l'on se réfère aux extrêmes climatiques d'autres parties du système climatique (Oliver et al., 2017^[143] ; Frölicher, Fischer et Gruber, 2018^[144]). Ces extrêmes sont toutefois suivis de près par l'aggravation des canicules terrestres dans les régions tropicales (Perkins-Kirkpatrick et Gibson, 2017^[146]) et des vagues de stress thermique (Mora et al., 2017^[196]).

Pour mieux mettre en évidence la diversité des changements relatifs de la chaleur extrême dans les différentes régions du monde, le Tableau 3.3 présente le rapport S/B médian des changements de la TXx pour différents degrés de réchauffement. Ce rapport est indiqué pour le monde entier, pour les PMA et pour la zone OCDE, à partir des valeurs relevées en juin 2021. À l'échelle mondiale, on constate que le changement relatif moyen de la chaleur extrême suit le changement de la température moyenne mondiale avec un rapport proche de 1:1. Les pays membres de l'OCDE connaissent un changement relatif de la chaleur extrême plus lent que la moyenne. Par contraste, les changements moyens dans les PMA sont environ 50 % plus rapides que la moyenne mondiale. Cette tendance selon laquelle les pays à faible revenu subissent des changements relatifs de la chaleur extrême plus rapides a été largement corroborée par des recherches antérieures (Mahlstein et al., 2011^[197] ; Harrington et al., 2016^[198] ; Frame et al., 2017^[194] ; Harrington et al., 2018^[187] ; King et Harrington, 2018^[199]).

Tableau 3.3. Exposition de la population à une chaleur extrême s'écartant des normes antérieures à l'avenir

Réchauffement mondial depuis 1861-80	Rapport signal/bruit (σ) de la TXx auquel pour une personne moyenne		
	Monde	PMA	Pays de l'OCDE
+ 1.0 °C	1.0 (0.3/1.7)	1.5 (0.3/2.2)	0.8 (0.3/1.5)
+ 1.5 °C	1.5 (0.6/2.3)	2.2 (0.6/3.3)	1.3 (0.6/2.1)
+ 2.0 °C	2.0 (1.0/3.1)	3.0 (1.1/4.4)	1.8 (1.0/2.8)
+ 2.5 °C	2.6 (1.3/3.8)	3.8 (1.4/5.4)	2.3 (1.3/3.5)
+ 3.0 °C	3.2 (1.5/4.6)	4.5 (1.6/6.5)	2.9 (1.6/4.1)
+ 3.5 °C	3.7 (1.8/5.2)	5.2 (1.9/7.4)	3.3 (1.8/4.7)

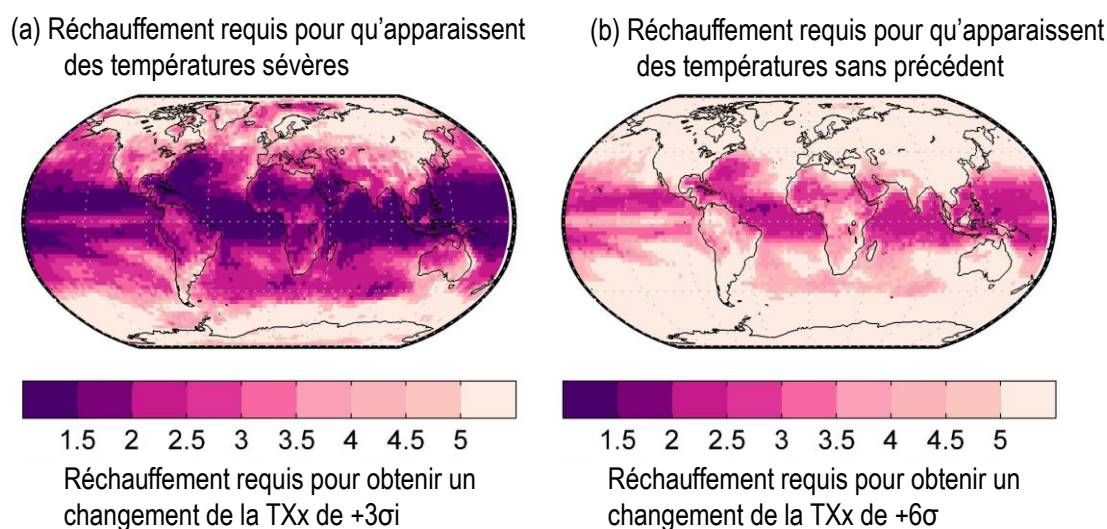
Note : Projections modélisées du rapport signal/bruit (S/B) de la TXx pour une personne moyenne à différents seuils de réchauffement futur (sur la base de RCP 8.5) et pour trois groupes de population : la population mondiale, la population de 46 pays moins avancés et la population de 38 pays membres de l'OCDE. Les données démographiques maillées sont fixées aux niveaux de 2015 et proviennent de (Consortium du réseau international d'information sur les sciences de la Terre - CIESIN, 2005^[200]). Les chiffres principaux indiquent le rapport S/B médian multi-modèles de la TXx pour une personne moyenne pour chaque groupe de population. Les valeurs entre crochets représentent l'incertitude des modèles climatiques (percentiles 10 et 90 de l'ensemble multi-modèles) associée aux rapports S/B pour une personne moyenne en réponse au niveau de réchauffement spécifié.

Chaque tonne de carbone rejetée rendra l'avenir de plus en plus méconnaissable

Le Graphique 3.11 montre les niveaux de réchauffement climatique moyen requis pour que les seuils futurs de chaleurs extrêmes soient franchis localement. Ces seuils sont représentés par des niveaux de changement de $+3\sigma$ et $+6\sigma$. Le niveau $+3\sigma$ correspond approximativement au moment où la journée la plus chaude d'une année moyenne dans le nouveau climat serait considérée comme rare dans le climat passé. Le niveau $+6\sigma$ quant à lui correspond à une situation où la journée la plus chaude, fût-ce pendant l'année la plus fraîche, dans le futur dépasserait encore les températures les plus chaudes jamais enregistrées dans le passé.

L'aggravation des modes de changement qui accompagne le réchauffement sur toute la planète, telle que la dépeint le Graphique 3.10 renforce la conclusion selon laquelle chaque tonne supplémentaire d'émissions de carbone rejetée dans l'atmosphère rendra l'avenir de plus en plus méconnaissable. Cela transparaît d'autant plus clairement lorsque l'on compare les expériences de chaleur extrême future avec celles des dernières décennies. Une comparaison avec un climat préindustriel donnerait des résultats encore plus spectaculaires.

Graphique 3.11. Réchauffement requis pour que des seuils définis de chaleur extrême supérieure aux valeurs antérieures soient franchis



Note : Les parties (a) et (b) utilisent les résultats présentés dans la partie 4.1b pour estimer la hausse de la température moyenne mondiale qui sera nécessaire pour assister à des rapports signal/bruit supérieurs à 3 et 6 respectivement, à chaque maille. La partie (a), $+3\sigma$, correspond approximativement au moment où la journée la plus chaude d'une année moyenne dans le nouveau climat serait considérée comme rare dans le climat passé. La partie (b), $+6\sigma$, correspond à une situation où la journée la plus chaude, fût-ce pendant l'année la plus fraîche, dans le futur dépasserait encore les températures les plus chaudes jamais enregistrées dans le passé.

Aucune définition individuelle ou seuil n'est suffisamment précis pour que l'on puisse déterminer à quel moment un lieu ne sera plus adapté à « l'habitabilité humaine ». Les différents pays et les communautés qui y vivent ont développé des niveaux de tolérance aux chaleurs inhabituelles très différents au fil du temps (que ce soit au travers de changements culturels, technologiques ou physiologiques). Aucun indice de chaleur extrême (ou de stress thermique) ne peut rendre compte de cette myriade de différences régionales et infrarégionales de la sensibilité aux changements futurs (Matthews, 2018^[201] ; Vanos et al., 2020^[202]). Par conséquent, l'indicateur climatique ou le seuil choisi pour définir les « changements catastrophiques », quel qu'il soit, mettra l'accent sur certaines régions plutôt que d'autres. Et trop souvent, il ne reflètera pas correctement les différents niveaux de résilience des communautés et des pays, ni leur potentiel d'adaptation.

3.5.3. L'importance de l'exposition et de la vulnérabilité dans l'évaluation des impacts futurs des conditions météorologiques extrêmes

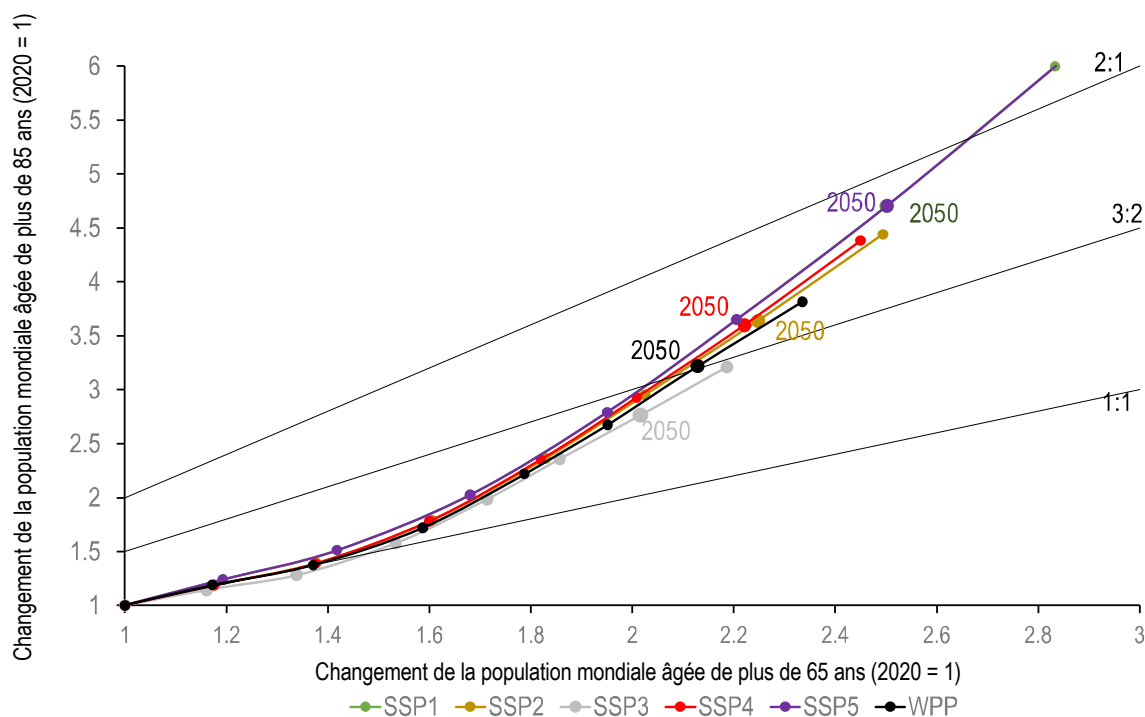
L'attribution des phénomènes extrêmes a évolué dans l'optique principale d'estimer les changements de la probabilité d'être témoin d'aléas météorologiques extrêmes. Elle offre ainsi un cadre quantitatif qui aide à comprendre comment les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes actuels pourraient s'aggraver sous l'effet du changement climatique anthropique.

Cependant, il est tout aussi important de déterminer comment les facteurs autres que l'aléa (à savoir l'exposition et la vulnérabilité) modulent la gravité des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi que leur potentiel d'évolution dans le temps. Il s'agit d'un point crucial pour les décideurs, qui doivent comprendre comment les risques et les impacts de ces phénomènes peuvent s'améliorer ou s'aggraver. Cette section examine plusieurs déterminants des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes autres que le facteur aléa, ainsi que la gamme de changements possibles attendus au cours du XXI^e siècle.

La part des populations vulnérables devrait augmenter

Le Graphique 3.12 présente les changements prévus dans deux catégories de personnes vulnérables – les personnes âgées de plus de 65 ans et celles âgées de plus de 85 ans. Pour ce faire, il crée cinq scénarios différents de résultats socio-économiques pour le XXI^e siècle (les « trajectoires socio-économiques partagées » ou SSP). Chaque cercle représente une nouvelle décennie, la population âgée mondiale allant en augmentant à partir des niveaux de 2020 (fixés à 1).

Graphique 3.12. Scénarios de vieillissement démographique



Note : Changements prévus (par rapport à 2020) de la population mondiale âgée de plus de 65 ans (axe horizontal) et de plus de 85 ans (axe vertical) pour chaque décennie entre 2020 et 2070, selon les cinq trajectoires socio-économiques partagées et les scénarios démographiques élaborés pour les Perspectives de la population dans le monde 2019 des Nations Unies. Chaque cercle représente une nouvelle décennie ; les cercles pleins plus gros représentent les valeurs pour 2050. Il est à noter que les trajectoires SSP 1 et 5 se superposent.

Deux tendances claires se dessinent concernant la croissance démographique mondiale et les populations les plus vulnérables. Premièrement, les taux de croissance démographique mondiale dans le groupe d'âge généralement considéré comme « vulnérable » – les plus de 65 ans – sont élevés. Selon le scénario considéré, ils seront multipliés par un facteur compris entre 2 et 2.5 d'ici 2050.

Deuxièmement, et ce point est plus inquiétant, les taux de croissance sont encore plus rapides lorsque l'on isole uniquement les personnes les plus vulnérables de ce groupe (celles âgées de plus de 85 ans) (Whitty et Watt, 2020_[203]). On s'attend à ce que la taille de ce sous-groupe soit multipliée par 3 ou 4 d'ici le milieu du siècle, puis par 5 ou 20 d'ici la fin du siècle (non représenté sur le Graphique 3.12). Dans tous les scénarios, le taux de croissance s'accélère au-delà des changements observés pour le groupe des plus de 65 ans à chaque nouvelle décennie.

Ces taux de changement prévus sont dus au vieillissement de la population mondiale et à l'amélioration des résultats des soins de santé. Ils indiquent clairement que les risques collectifs posés par les phénomènes météorologiques extrêmes, et particulièrement par les canicules extrêmes (Whitty et Watt, 2020_[203]), pourraient augmenter de manière significative. Ce sera le cas même si les aléas liés au climat

restent eux-mêmes inchangés. Les chapitres 1, 2 et 5 analysent d'autres facteurs socio-économiques susceptibles d'avoir un rôle dans l'exposition et la vulnérabilité des systèmes humains et naturels.

La gravité d'un aléa est un indicateur imparfait de la gravité des impacts

Les impacts d'un phénomène météorologique extrême peuvent varier selon la vulnérabilité des communautés exposées (Quigley et al., 2020^[204]). En effet, la rareté de l'aléa météorologique en question n'est pas toujours un bon indicateur de l'intensité potentielle des impacts du phénomène. Prenons deux exemples de phénomènes météorologiques extrêmes récents qui ont fait l'objet d'analyses d'attribution. Le premier exemple décrit comment, suite à de fortes pluies persistantes, le sud du Royaume-Uni s'est trouvé en proie à des inondations au cours de l'hiver 2013-2014 (Schaller et al., 2016^[205]) ; le second exemple porte sur les inondations provoquées par les précipitations extrêmes qui ont sévi en Chine méridionale lors la saison des pluies de mars-juillet 2019 (Li et al., 2021^[206]) ; les deux exemples sont résumés sur le Graphique 3.13.

Graphique 3.13. Gravité et impacts des phénomènes météorologiques extrêmes

	Gravité de l'aléa météorologique	Gravité des impacts du phénomène météorologique
Inondations du printemps 2019 en Chine	1 fois tous les 10 ans	-3 milliards USD de dommages -19 000 maisons détruites -83 000 maisons endommagées -420 000 ha de cultures endommagées -91 victimes
Inondations de 2013-14 dans le sud du Royaume-Uni	1 fois tous les 250 ans	-1.5-2.2 milliards USD de dommages -11 000 maisons endommagées -45 000 ha de terres agricoles inondées

Note : Représentation schématique des deux phénomènes extrêmes pris en exemple : les inondations du printemps 2019 en Chine méridionale et les inondations de l'hiver 2013-14 dans le sud du Royaume-Uni. La taille des cercles et des rectangles colorés représente, respectivement, la gravité relative du phénomène météorologique lui-même et l'ampleur des impacts sociaux, économiques et sanitaires du phénomène. La gravité du phénomène est décrite en termes de période de retour, qui dénote la probabilité d'assister à un phénomène de gravité égale ou supérieure au cours de toute année donnée.

Les inondations de 2013-14 dans le sud du Royaume-Uni

Les précipitations qui se sont abattues sur le sud du Royaume-Uni au cours de l'hiver 2013-2014 ont été exceptionnelles par leur intensité (Schaller et al., 2016^[205]). Selon l'Office météorologique du Royaume-Uni (2014^[207]), 12 tempêtes sont passées au-dessus du pays entre la mi-décembre 2013 et la mi-février 2014, marquant la période la plus tempétueuse depuis plus de 20 ans. L'Agence du Royaume-Uni britannique pour l'environnement a estimé les coûts et impacts totaux des inondations de l'hiver 2013-14 à une fourchette de 1.5-2.2 milliards USD (1.0-1.5 milliard GBP) en 2014 (Chatterton et al., 2016^[208]). La plupart de ces coûts correspondaient aux dégâts infligés à 11 000 foyers. On estime par ailleurs que 45 000 hectares de terres agricoles ont été inondés au cours de cet épisode. Cette séquence de systèmes dépressionnaires consécutifs était inhabituelle : la fréquence des anomalies pluviométriques enregistrées

dans les régions du sud les plus touchées a été estimée à une fois tous les 250 ans (UK Met Office, 2014^[207]).

Si les impacts de ces inondations ont été importants, ils ont été de moindre ampleur que ceux d'autres inondations survenues au Royaume-Uni au cours de la décennie précédente. En effet, bien que les inondations de l'automne 2000 aient été moins graves d'un point de vue météorologique (UK Met Office, 2014^[207]), leur coût total a dépassé celui de l'épisode de 2013-2014 (Pall et al., 2011^[209]). Par ailleurs, les inondations de l'été 2007 ont eu des répercussions économiques près de trois fois supérieures à celles des inondations de 2013-2014. La réduction des coûts a été attribuée en grande partie au fait que les systèmes de protection contre les inondations et les systèmes d'alerte précoce avaient été améliorés dans l'intervalle (Chatterton et al., 2016^[208]).

Les inondations de 2019 en Chine

De mars à juillet 2019, la Chine méridionale a également subi les impacts de phénomènes météorologiques violents. Cette année-là, la saison des pluies, longue et intense, a provoqué de vastes inondations dans cette région très peuplée du pays (Li et al., 2021^[206]). Alors que la « première saison des pluies » s'étend généralement d'avril à juin dans cette région de Chine, en 2019, elle a commencé 28 jours plus tôt et s'est terminée 22 jours plus tard que d'habitude (Li et al., 2021^[206]). Ces précipitations persistantes et supérieures à la normale ont provoqué de graves inondations au cours de la deuxième semaine de juin. Selon le ministère chinois de la Gestion des situations d'urgence, les inondations et les glissements de terrain ont touché directement 6 millions de personnes. Ils ont également provoqué 91 victimes, endommagé ou détruit plus de 100 000 habitations et causé des dégâts sur quelque 419 000 hectares de cultures. Au total, les coûts directs ont été estimés à 3 milliards USD (Li et al., 2021^[206]).

Néanmoins, une évaluation multi-méthodes des facteurs météorologiques de cet épisode a permis de constater qu'il était en fait relativement anodin d'un point de vue statistique. Ainsi, Li et al. (2021^[206]) estiment la fréquence de récurrence de cet événement dans le climat actuel à entre 1 fois tous les 6 et 1 fois tous les 28 ans, avec une estimation centrale de 1 fois tous les 10 ans. D'un point de vue qualitatif, cette estimation est corroborée par l'occurrence dans la même région, en 2008, d'une inondation qui a provoqué des impacts similaires. Ces exemples mettent en évidence la vulnérabilité inhérente des personnes exposées aux effets des phénomènes météorologiques extrêmes. Cet épisode montre en particulier que des aléas météorologiques relativement courants ou fréquents peuvent causer des dégâts considérables lorsqu'ils frappent des populations vulnérables et exposées.

Heureusement, l'amélioration des résultats constatée au Royaume-Uni à la suite d'inondations récurrentes montre également qu'il existe d'amples possibilités de renforcer la résilience des pays vulnérables sur le plan climatique. Autrement dit, pour de nombreux types de phénomènes météorologiques extrêmes et de régions, les possibilités de mise en œuvre de mesures ciblées de réduction des risques de catastrophe à moyen terme peuvent souvent contrebalancer l'aggravation des aléas météorologiques induite par le changement climatique au cours de la même période [(Jongman et al., 2015^[210] ; Kreibich et al., 2017^[211]) et analyse détaillée au chapitre 5].

C'est dans les pays pauvres que les possibilités de réduire la vulnérabilité sont les plus importantes

Comme nous l'avons souligné plus haut, il est souvent possible de réduire les impacts des conditions météorologiques extrêmes futures, même si le changement climatique aggrave les aléas eux-mêmes. Des mesures ciblées peuvent améliorer la résilience climatique, souvent par le biais d'améliorations plus larges des niveaux de vie et de la prospérité économique (Schleussner et al., 2021^[212]). Ces interventions peuvent notamment porter sur la lutte contre la pauvreté, les soins de santé, la sécurité sociale et les mesures d'adaptation, entre autres.

Pour étayer ce propos, le nombre de décès liés à des phénomènes climatiques extrêmes a largement diminué à mesure que la prospérité économique a progressé au XX^e siècle (Ritchie et Roser, 2014^[213]). Les mesures de renforcement de la résilience sont donc susceptibles d'atténuer les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes, qui autrement s'aggravaient. Cela est particulièrement vrai pour les pays qui sont aujourd'hui les plus vulnérables aux impacts des conditions météorologiques extrêmes (Schleussner et al., 2021^[212]). Il existe toutefois des obstacles à la mise en œuvre de ces mesures, principalement liés à la gouvernance et au financement (Andrijevic et al., 2019^[214]).

3.5.4. *Élaboration d'un inventaire des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes attribuables au changement climatique anthropique*

Il est urgent de dresser un inventaire des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes imputables au changement climatique anthropique. Cet inventaire viendrait compléter les bases de données sur les catastrophes, qui compilent les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes sans chercher à savoir s'ils ont ou non été influencés par le réchauffement climatique. Cette désagrégation permettra de définir les priorités futures en matière d'adaptation à l'échelle des décisions locales (Otto et al., 2015^[215]). Un tel inventaire renforcerait également la base factuelle sur laquelle s'appuient les débats politiques plus généraux concernant les pertes et les dommages liés au changement climatique et, plus généralement, le financement pour le climat.

Le Graphique 3.14 propose un cadre préliminaire pour l'élaboration de l'inventaire des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes attribuables au changement climatique. Ce cadre est composé de trois parties. Premièrement, il recense tous les impacts possibles associés au phénomène météorologique extrême considéré. Deuxièmement, il détermine la fraction du risque attribuable associée au phénomène réputé avoir causé ces impacts. Troisièmement, il multiplie les deux pour obtenir une estimation des impacts liés au phénomène qui ne se seraient pas produits si un phénomène tout aussi rare était survenu dans « un monde sans changement climatique » (Allen, 2003^[216] ; Frame et al., 2020^[138] ; Clarke, E. L. Otto et Jones, 2021^[139]).

Ce cadre fait naturellement abstraction de l'exposition et de la vulnérabilité à l'aléa considéré. De même, il ne cherche pas à déterminer si des politiques et des décisions antérieures influençant ces facteurs auraient pu réduire les impacts. À cet égard, on pourra continuer à étoffer cet inventaire pour suivre l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité à des types spécifiques d'aléa et ainsi soutenir les efforts de réduction du risque global de pertes et de dommages.

Graphique 3.14. Cadre pour l'inventaire des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes dus au changement climatique



Note : Représentation schématisée de l'application de la science de l'attribution à l'estimation des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes attribuables au changement climatique anthropique. Les incertitudes associées à chacune des étapes (1) et (2) sont examinées plus en détail dans les sections 2.2 et 2.3 respectivement.

Comme pour d'autres branches de la science du climat, toute méthode visant à quantifier comment les signaux de changement climatique à grande échelle et moyennés dans le temps se traduisent à des échelles plus fines, plus pertinentes pour la prise de décision, génère de l'incertitude (Maraun et al., 2017^[217] ; Shepherd et Sobel, 2020^[218]). Ce truisme s'applique à l'étape « attribution » du cadre d'inventaire conceptualisé au Graphique 3.14.. Qui plus est, les incertitudes sont encore aggravées par d'autres facteurs liés à la quantification des impacts associés à un phénomène extrême. Toutefois, l'incertitude en soi n'est pas un obstacle irrémédiable à l'obtention d'informations utiles et exploitables (Shepherd, 2019^[12]), en particulier si cette incertitude est bien comprise et si ses déterminants sont dissociés (Marotzke et al., 2017^[219]).

3.5.5. Obstacles à la compréhension des impacts et des facteurs des phénomènes météorologiques extrêmes dans les pays à faible revenu

L'attribution probabiliste présente de multiples avantages, permettant notamment d'établir un lien de causalité entre les impacts des phénomènes météorologiques extrêmes récents et le changement climatique. Cependant, les mêmes méthodes aboutissent souvent à des résultats peu concluants en ce qui concerne les phénomènes météorologiques extrêmes qui frappent les pays à faible revenu. Le fait que la couverture géographique des études d'attribution soit fortement biaisée en faveur des pays à revenu élevé s'explique par plusieurs facteurs, examinés dans d'autres études (Otto et al., 2020^[133] ; Otto et al., 2020^[220]). Les obstacles spécifiques à l'amélioration qualitative et quantitative des études d'attribution des phénomènes extrêmes dans les pays à faible revenu sont détaillés ci-après.

1. **Manque de relevés d'observation** : les études d'attribution sont plus fructueuses dans les régions où les scientifiques peuvent quantifier la gravité du phénomène météorologique extrême en se référant aux relevés historiques. Par conséquent, la capacité d'effectuer des analyses d'attribution sera toujours limitée dans les régions où les relevés d'observation sont inexistants, ne sont pas

accessibles au public ou couvrent une courte période. Dans de nombreux pays à faible revenu, la couverture limitée, tant dans l'espace que dans le temps, des données d'observation des conditions météorologiques antérieures limite fondamentalement la capacité de contextualiser la gravité des phénomènes ou de valider directement la qualité des modèles climatiques utilisés.

2. **Insuffisances des modèles climatiques** : de nombreux pays à faible revenu sont situés dans des régions tropicales, où les phénomènes météorologiques extrêmes sont fortement influencés par les processus physiques (comme la convection ou les interactions océan-atmosphère). Les modèles climatiques ont beaucoup plus de difficultés pour simuler correctement ces processus. Autre interprétation possible, les modèles climatiques nécessitent une résolution spatiale beaucoup plus élevée pour produire des simulations de qualité comparable dans les tropiques (par rapport aux régions de plus haute latitude). Cela tient à ce que les processus qui influent sur la formation des phénomènes météorologiques extrêmes sont d'une part plus incertains et d'autre part mal simulés par les modèles à résolution grossière. Ces limites engendrent un obstacle supplémentaire pour la réalisation d'études d'attribution de qualité égale dans les différentes parties du monde.
3. **Modes de variabilité climatique interne affectant les inondations et les sécheresses extrêmes** : le signal de changement climatique pour les phénomènes hydrologiques extrêmes (comme les sécheresses et les inondations) qui touchent les pays des basses latitudes est modulé par d'importants modes de variabilité climatique naturelle (tels que l'oscillation Madden-Julian, l'ENSO et le dipôle de l'océan Indien). Même si un hypothétique signal de changement climatique concernant les précipitations extrêmes était uniforme pour l'ensemble des pays, il faudrait plus de temps pour que ce signal soit détecté dans les pays tropicaux – qui comptent une part disproportionnée de pays à faible revenu – en raison de ces importants facteurs de variabilité naturelle dans le système climatique. De surcroît, ces modes de variabilité climatique sont notoirement difficiles à simuler dans les modèles climatiques. Cela crée une contrainte supplémentaire quant à savoir quels modèles peuvent être considérés comme « adaptés à l'usage » pour une analyse d'attribution.
4. **Biais de sélection** : il n'existe pas de méthode systématique pour décider quels phénomènes météorologiques extrêmes justifient de mener une analyse d'attribution. La plupart des études d'attribution sont lancées sur la base de l'identification des phénomènes à impact dont les scientifiques ont connaissance. Cela conduit à se concentrer sur les régions dans lesquelles les structures de notification d'impacts sont les plus robustes, où l'information est diffusée immédiatement et où les impacts liés aux conditions météorologiques captent l'attention des médias internationaux. En outre, les spécialistes de la science de l'attribution dans les pays riches sont souvent financés par un gouvernement ou un service météorologique national, ce qui les amène à mettre l'accent sur les phénomènes extrêmes qui surviennent dans le pays du bailleur de fonds. Ces facteurs entraînent un suréchantillonnage systématique des phénomènes touchant les pays riches dans les études d'attribution, que les données et les outils de modélisation soient ou non particulièrement adaptés à cette région.
5. **Détectabilité des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes** : les impacts des conditions météorologiques extrêmes les plus faciles à notifier sont les dommages causés aux biens physiques assurés après une catastrophe – en particulier les dommages causés par les inondations, les feux de végétation et les ouragans/cyclones tropicaux. Dans les pays à revenu plus faible, les actifs physiques sensibles aux conditions météorologiques extrêmes sont également moins bien couverts par les assurances. Cela se traduit par un décalage entre les impacts réels et l'ampleur des impacts enregistrés dans les bases de données sur les catastrophes. De même, les conséquences les plus graves des phénomènes météorologiques extrêmes qui touchent les pays à faible revenu, tels que les sécheresses, se manifestent souvent sous la forme d'impacts diffus. Ces impacts apparaissent au fil du temps et nécessitent des outils

de surveillance plus élaborés pour être quantifiés. Ensemble, ces problèmes exacerbent les biais de sélection et les inégalités dans la couverture régionale des études d'attribution.

6. **Différences dans les mécanismes de notification des impacts des phénomènes extrêmes :** enfin, les institutions qui communiquent les données relatives aux impacts des phénomènes météorologiques extrêmes aux bases de données sur les catastrophes naturelles diffèrent en fonction du niveau de revenu du pays. Dans les pays à revenu élevé, cette fonction est en général directement exercée par les autorités publiques, qui disposent de ressources importantes. Dans les pays à faible revenu, en revanche, ce sont souvent les organisations non gouvernementales (ONG) ou d'autres organismes d'aide qui communiquent ces données. Ce travail est alors un « sous-produit » des systèmes de surveillance utilisés pour détecter les endroits où l'aide humanitaire est la plus nécessaire. Cela entraîne des disparités dans les classes de phénomènes climatiques et les types d'informations qui font l'objet d'une surveillance et sont ensuite notifiés. Les pays européens, par exemple, ont mis au point des mécanismes robustes pour quantifier les impacts des canicules extrêmes peu après leur survenue. Cependant, les phénomènes de même gravité qui touchent l'Afrique subsaharienne passent souvent inaperçus (Harrington et Otto, 2020^[221]), dans la mesure où les ONG ne peuvent identifier que les impacts humanitaires des inondations et des sécheresses. Par conséquent, la plupart des bases de données consacrées aux impacts des canicules aux XX^e et XXI^e siècles mettent artificiellement l'accent sur les phénomènes européens. Dès lors, on en conclut à tort qu'il n'y a pas d'impacts liés à la chaleur dans de nombreux pays à faible revenu.

Il faudra combler de nombreuses lacunes sur les plans de la recherche, des données et du financement pour bien comprendre, quantifier et surveiller l'aggravation des impacts des phénomènes météorologiques extrêmes dus au changement climatique. Tout d'abord, la quantification des impacts réellement causés par les phénomènes météorologiques extrêmes se heurte au caractère extrêmement lacunaire des informations. Un soutien ciblé est nécessaire pour réduire les disparités géographiques dans la couverture des programmes de surveillance sur le terrain. Cela vaut également pour les caractéristiques météorologiques des phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi que pour les impacts sociaux, sanitaires et économiques de ces phénomènes.

La mise en place d'un système de notification systématique et ascendant qui permette d'enregistrer les caractéristiques météorologiques de l'ensemble des phénomènes météorologiques extrêmes constitue une autre urgence. Ces données doivent être suffisamment détaillées pour que l'on puisse ensuite mener une analyse d'attribution. Il est nécessaire de changer radicalement les modes de dotation en ressources de la science, en particulier dans les pays à faible revenu. Les obstacles à la réalisation d'une étude d'attribution se situeront toujours dans ces pays. Par conséquent, les pays à revenu élevé doivent offrir à la fois leur expertise scientifique et leur soutien financier pour assurer l'accès de tous les pays à des applications robustes de la science de l'attribution des phénomènes (au sens large).

3.6. Effets en cascade du franchissement d'un point de basculement climatique : effondrement de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC)

Le franchissement de points de basculement dans le système climatique, entraînant des dommages généralisés, brutaux et/ou irréversibles, fait partie des risques les plus importants liés au changement climatique (Lenton et al., 2008^[4] ; Lenton et al., 2019^[64]). Au sens du GIEC, un point de basculement est un « degré de changement [irréversible] des propriétés d'un système au-delà duquel le système en question se réorganise, souvent de façon abrupte, et ne retrouve pas son état initial même si les facteurs à l'origine du changement sont éliminés. En ce qui concerne le système climatique, la notion de point de basculement fait référence à un seuil critique au-delà duquel le climat mondial ou un climat régional passe

d'un état stable à un autre état stable. » (GIEC, 2018^[5]). Le franchissement des points de basculement pourrait avoir de graves répercussions sociales et économiques (Lenton et Ciscar, 2012^[70] ; Lontzek et al., 2015^[222] ; Cai, Lenton et Lontzek, 2016^[68]).

Un grand nombre de sous-systèmes du système climatique terrestre – les « éléments basculants » (Lenton et al., 2019^[64]) – pourraient franchir un point de basculement au cours de ce siècle sous l'effet du changement climatique. Citons par exemple l'effondrement de l'AMOC, le rétrécissement irréversible des inlandsis du Groenland ou de l'Antarctique occidental, la perturbation des principaux régimes de mousson ou le dépérissement de la forêt tropicale amazonienne (Lenton et al., 2008^[4] ; Lenton et al., 2019^[64]).

Depuis plus d'une décennie, les évaluations scientifiques s'accordent sur le fait que plusieurs points de basculement ont des probabilités significatives d'être franchis (quelques dixièmes de point de pourcentage), même à de faibles niveaux de réchauffement. Ce pourcentage passe à « plus probable qu'improbable » (>50 %) dans l'hypothèse d'un réchauffement climatique non atténué (Kriegler et al., 2009^[66]). L'efficacité des actions collectives menées pour éviter le franchissement des points de basculement climatique pourrait encore dépendre de la réduction de l'incertitude entourant la localisation de ces points (Barrett et Dannenberg, 2014^[223]). Néanmoins, les données scientifiques les plus récentes montrent clairement que certains points de basculement pourraient être franchis dans la fourchette de 1.5 à 2 °C visée par l'Accord de Paris, et que beaucoup d'autres pourraient l'être si le réchauffement atteint 3 à 4 °C [(Lenton et al., 2019^[64]) et Tableau 3.1.]. Il existe encore très peu d'études sur les divers impacts du franchissement de différents points de basculement climatique (Tableau 3.2.).

Des travaux récents ont également mis en évidence le risque que le franchissement d'un point de basculement augmente la probabilité d'en franchir un autre et entraîne ainsi des impacts « en cascade » (Cai, Lenton et Lontzek, 2016^[68] ; Lenton et al., 2019^[64]). Dans le pire des cas, cette cascade pourrait conduire à un nouvel état climatique de type « serre », moins habitable (Steffen et al., 2018^[224]). De telles interactions pourraient s'opérer par le biais de la circulation océanique et atmosphérique ou par des boucles de rétroaction augmentant les niveaux de GES et la température mondiale (Tableau 3.2.).

Dans ce contexte, ce chapitre se concentre sur les impacts en cascade d'un effondrement potentiel de l'AMOC et ses effets en cascade sur d'autres éléments basculants. L'effondrement de l'AMOC a été choisi parce qu'il s'agit de l'élément basculant le plus étudié, qu'il relie entre elles les composantes du système climatique et qu'il pourrait avoir d'énormes répercussions.

3.6.1. Pourquoi un effondrement de l'AMOC serait-il inquiétant ?

L'effondrement de l'AMOC implique une réorganisation fondamentale de la circulation océanique. Il entraînerait une redistribution de la chaleur autour de la planète, qui déclencherait une réponse couplée de la glace de mer et de l'atmosphère (le mécanisme de l'AMOC et de son arrêt potentiel est expliqué dans l'Encadré 3.6). Par le passé, l'effondrement de l'AMOC a entraîné un refroidissement radical du climat européen. Il a modifié les régimes pluviométriques, rendant certaines parties de l'Europe, de l'Afrique du Nord et de l'Inde plus sèches et certaines régions de l'hémisphère Sud plus humides. Il a également eu de profondes répercussions sur les écosystèmes marins et terrestres (ses impacts physiques sont analysés dans le Tableau 3.2.).

Dans les scénarios d'affaiblissement de l'AMOC (sans arrêt total), caractérisés par l'arrêt de la convection profonde dans la mer du Labrador, les impacts restent importants (Tableau 3.2.). Ils peuvent se propager plus rapidement que ceux d'un arrêt complet de l'AMOC (Drijfhout et al., 2015^[225] ; Sgubin et al., 2017^[226]). Ils comprennent notamment des effets dynamiques sur le niveau de la mer, qui se traduiraient par une montée des eaux tout le long de la côte est des États-Unis, atteignant environ 20 cm dans les régions de Boston, New York et Washington, DC (Yin, Schlesinger et Stouffer, 2009^[227]). Une hausse des niveaux marins le long de la côte nord-est de l'Amérique du Nord a d'ailleurs déjà été observée en 2009-10 –

période durant laquelle l'AMOC a fortement diminué – et le niveau de la mer a alors augmenté de 128 mm à New York (Yin, Schlesinger et Stouffer, 2009^[227]).

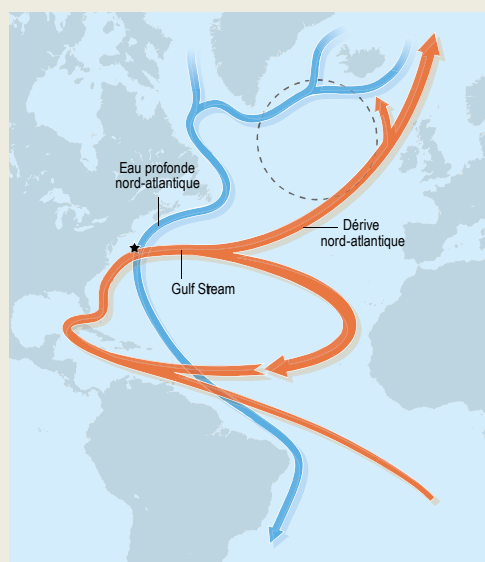
Ces effets climatiques peuvent être comparés au petit âge glaciaire (PAG), période caractérisée par un net refroidissement des conditions météorologiques dans l'hémisphère Nord qui a eu lieu entre le XV^e et le XIX^e siècle (Moreno-Chamarro et al., 2016^[228]). Le PAG est l'une des oscillations climatiques d'échelle centennale survenues au cours de la période interglaciaire actuelle. Selon l'explication la plus communément admise, il aurait été provoqué par des changements de l'AMOC déclenchés par l'activité volcanique, qui auraient amplifié la variabilité interne du climat (Schleussner et Feulner, 2013^[229]). Plus précisément, il est possible que les changements du forçage en eau douce aient réduit la formation de la masse d'eau de la mer du Labrador et contribué à amorcer le processus de refroidissement du PAG (Moffa-Sánchez et al., 2014^[230]). L'effondrement de l'AMOC, ou son affaiblissement abrupt associé à l'arrêt de la convection dans le gyre subpolaire, pourrait donc avoir des effets en cascade bien au-delà des régions du globe où il a lieu (Wunderling et al., 2021^[69]).

Le réchauffement climatique peut ralentir la circulation de retournement et pourrait conduire à un effondrement de l'AMOC si celle-ci franchit un point de basculement (Lenton et al., 2008^[4]). Deux effets sont pertinents : l'effet thermique et l'effet halin (salinité). Le réchauffement, qui est plus important dans les hautes latitudes que dans les tropiques, réduit la densité des eaux de surface aux hautes latitudes. Cet effet affaiblit la circulation, mais il est peu probable qu'il l'arrête. Le risque le plus important provient de l'augmentation de l'apport d'eau douce, qui rend l'Atlantique Nord moins salé (Hawkins et al., 2011^[231]). Le réchauffement tend à augmenter la teneur de l'atmosphère en humidité et les précipitations aux hautes latitudes qui tombent directement sur l'Atlantique Nord. Il entraîne également un ruissellement depuis les terres vers le bassin Arctique et l'Atlantique Nord. Par ailleurs, le réchauffement accélère la fonte de l'inlandsis du Groenland, augmentant la quantité d'eau douce à proximité des régions de convection profonde.

Encadré 3.6. Qu'est-ce que l'AMOC et pourquoi a-t-elle un point de basculement ?

La circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC) est la branche atlantique de la circulation thermohaline (THC), qui transporte la chaleur et le sel dans l'océan mondial. La THC, parfois appelée le « grand tapis roulant » océanique, transporte environ 30 fois plus d'eau que tous les cours d'eau douce du monde réunis. L'AMOC est un système de courants dans l'océan Atlantique qui transporte la chaleur de l'hémisphère Sud et des tropiques vers les moyennes et hautes latitudes du Nord, amenant les eaux de surface chaudes vers l'Europe (flèches rouges sur le Graphique 3.15). Dans l'Atlantique Nord, un des bras du Gulf Stream se dirige vers l'Islande, formant une partie de l'AMOC qui transporte la chaleur loin vers le nord. Lorsque cette eau chaude se dirige vers le nord, elle libère de la chaleur dans l'atmosphère, ce qui la refroidit. Elle libère également de l'eau douce dans l'atmosphère par évaporation, devenant ainsi plus salée. Ces deux effets rendent les eaux de surface plus denses.

Graphique 3.15. La circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique



Source : (Praetorius, 2018^[232])

De part et d'autre du Groenland, les eaux de surface deviennent suffisamment froides, salées et donc denses pour s'enfoncer très profondément dans l'océan, à travers un processus connu sous le nom de convection profonde. Cette « eau profonde nord-atlantique (EPNA) » entraîne, dans l'océan profond, un retour d'eau froide vers le sud (flèche bleue sur le Graphique 3.15). Ces eaux froides profondes finissent par revenir à la surface dans l'océan Austral, bouclant ainsi la boucle de la circulation de retournement.

L'AMOC s'auto-entretient sous l'effet d'un processus appelé feedback (positif) d'advection de sel (Cheng et al., 2018^[233]). En substance, la circulation elle-même maintient les eaux de surface denses et salées de l'Atlantique Nord, qui peuvent s'enfoncer dans les profondeurs et soutenir la circulation. La circulation peut être interrompue, de sorte que l'AMOC passe à un autre état stable (Stommel, 1961^[234]). Si l'AMOC entraîne le sel à sa limite sud (à environ 34°S de latitude), elle se trouve dans un régime de « bistabilité » – autrement dit, les deux modes « marche » et « arrêt » de l'AMOC sont stables. Les données d'observation actuelles laissent penser que l'AMOC est bistable en ce moment. À l'inverse, de

nombreux modèles climatiques sont biaisés dans le sens d'une surestimation de la stabilité, dans la mesure où ils ne font pas apparaître d'apport net de sel et se trouvent donc dans un régime « monostable ».

Le point de basculement entre les modes « marche » et « arrêt » peut être franchi si une quantité suffisante d'eau douce pénètre dans la formation d'eau profonde nord-atlantique à cet endroit. Une fois que l'AMOC est en « arrêt », il existe un autre point de basculement à partir duquel elle peut être remise en « marche ». Ces deux points de basculement délimitent la région de « bistabilité », dans laquelle les deux modes sont stables dans les mêmes conditions limites du climat mondial.

L'inquiétude actuelle concernant un éventuel point de basculement de l'AMOC provient en partie des connaissances livrées par plusieurs dizaines de milliers d'années de données climatiques préhistoriques (Barker et Knorr, 2016^[235]). Par le passé, l'AMOC a basculé à de multiples reprises entre les modes « marche » et « arrêt », déclenchant des changements rapides des températures et des régimes pluviométriques dans l'Atlantique Nord et au-delà (Barker et Knorr, 2016^[235]). Durant la dernière période glaciaire, il y a eu plus de 20 « événements Dansgaard-Oeschger » (du nom de leurs découvreurs), au cours desquels l'AMOC s'est brusquement renforcée. Au bout d'un millier d'années ou plus, elle s'est brusquement effondrée, entraînant des changements soudains de la couverture de glace de mer et des régimes de circulation atmosphérique (Buizert et Schmittner, 2015^[236]). Des données indirectes laissent penser que le gyre subpolaire et l'AMOC ne sont pas complètement stables au cours de la période interglaciaire actuelle, même en l'absence de changement climatique anthropique. La section 3.6.2 vise à déterminer si le réchauffement climatique est capable d'affecter leur stabilité, et si oui de quelle manière.

L'inlandsis du Groenland fond à un rythme proche de la limite supérieure des projections, soit environ six fois plus vite que dans les années 1990. Selon une étude, l'Atlantique Nord subpolaire est depuis peu moins salé qu'il ne l'a jamais été au cours des 120 dernières années (Holliday et al., 2020^[237]). Des études récentes sont parvenues à la conclusion que l'AMOC s'était affaiblie de 15 % depuis les années 1950 (Rahmstorf et al., 2015^[238]). Cela se traduit par la présence d'un « point froid » dans l'océan au sud du Groenland – le seul endroit de la planète qui ne se réchauffe pas de manière constante (Caesar et al., 2018^[239]). Ce ralentissement de l'AMOC est sans précédent au cours des 1000 dernières années écoulées (Rahmstorf et al., 2015^[238] ; Caesar et al., 2021^[240]). Les bilans d'eau douce indiquent que la contribution la plus importante à ce phénomène provient de l'augmentation des précipitations dans les hautes latitudes nord. Cependant, les eaux de fonte du Groenland jouent également un rôle important et croissant (Bamber et al., 2018^[241]).

L'hypothèse d'un ralentissement de l'AMOC est étayée par d'autres éléments, notamment l'augmentation de la salinité de l'Atlantique Sud observée au cours des dernières décennies. Cela signifierait qu'une plus grande partie du sel qui était autrefois transporté vers le nord par l'AMOC reste maintenant dans les tropiques (Zhu et Liu, 2020^[242]). D'autres travaux font valoir que le Gulf Stream le long de la côte de la Floride s'est affaibli. Ils notent également que cet affaiblissement a été particulièrement marqué au cours des deux dernières décennies (Piecuch, 2020^[243]). Des signaux d'alerte précoce significatifs ont été relevés dans plusieurs indices AMOC indépendants fondés sur des données d'observation (Boers, 2021^[244]).

Bien que les recherches récentes montrent que l'AMOC a atteint sa plus faible intensité depuis un millénaire, le dernier rapport d'évaluation du GIEC (AR6) table, avec un niveau de confiance moyen, sur le fait qu'il n'y aura pas d'effondrement brutal de l'AMOC avant 2100 (GIEC, 2021^[14]). Il est « très probable » que l'AMOC continue de s'affaiblir au cours de ce siècle. Néanmoins, son effondrement au XXI^e siècle est considéré comme très improbable, quoique physiquement plausible (Douvile et al., 2021^[245]). Cette faible probabilité s'explique en partie par l'hypothèse testée, qui est celle d'un arrêt complet de l'AMOC avant la fin du siècle. Les résultats des modèles utilisés par le GIEC peuvent

s'interpréter différemment. Dans un modèle, l'effondrement de l'AMOC se produit à un réchauffement de 1.4 °C par rapport aux températures mondiales préindustrielles ; dans deux autres itérations du même modèle, il se produit à 1.6-1.9 °C ; et dans deux itérations d'un modèle différent, il intervient à 2.2-2.5 °C (Drijfhout et al., 2015^[225] ; Sgubin et al., 2017^[226]). Il est en outre apparu que les modèles du GIEC étaient biaisés dans le sens d'une surestimation de la stabilité par rapport aux contraintes d'observation. Après correction de ce biais, un modèle conclut que l'effondrement de l'AMOC se produit lorsque la concentration de CO₂ est multipliée par deux (Liu et al., 2017^[246]).

Le présent rapport considère que la possibilité d'un effondrement de l'AMOC à un niveau de réchauffement climatique de 2-3 °C par rapport aux températures préindustrielles constitue un risque important qui mérite d'être évalué. Cette hypothèse est conforme aux avis formulés par les experts dans le passé (Kriegler et al., 2009^[66]). Qui plus est, les impacts de l'affaiblissement attendu de l'AMOC constituent une version réduite des impacts d'un arrêt total. L'analyse d'impact est donc utile dans les deux cas. Même si l'AMOC ne s'effondre pas complètement, l'effondrement de la convection profonde dans le gyre subpolaire de l'Atlantique Nord et l'affaiblissement brutal de l'AMOC qui en résulterait auraient des répercussions importantes (Sgubin et al., 2017^[226] ; Swingedouw et al., 2021^[247]). Dans ce scénario, la convection profonde cesserait dans la région de la mer du Labrador, ne subsistant que dans les mers du Groenland, d'Islande et de Norvège.

Cette analyse considère que le scénario ci-dessus est « aussi probable qu'improbable » (probabilité de 33 à 66 %) pour un réchauffement climatique de 1.5-2 °C par rapport aux températures préindustrielles. Cette estimation s'appuie sur l'observation que cette éventualité se produit à 1.1-1.4 °C dans trois modèles climatiques, à 1.6-1.9 °C dans cinq itérations supplémentaires de quatre modèles, et à 2.0 °C dans un autre cas (Drijfhout et al., 2015^[225] ; Sgubin et al., 2017^[226]). Cette section s'appuie sur des expériences réalisées avec des modèles climatiques de pointe (voir Annexe 3.A pour une description méthodologique détaillée) pour examiner les impacts d'un effondrement de l'AMOC et la façon dont un tel événement est susceptible d'interagir globalement avec d'autres éléments basculants du système climatique pour en augmenter ou diminuer la probabilité.

3.6.2. Impacts climatiques d'un effondrement de l'AMOC et effets en cascade sur d'autres éléments basculants

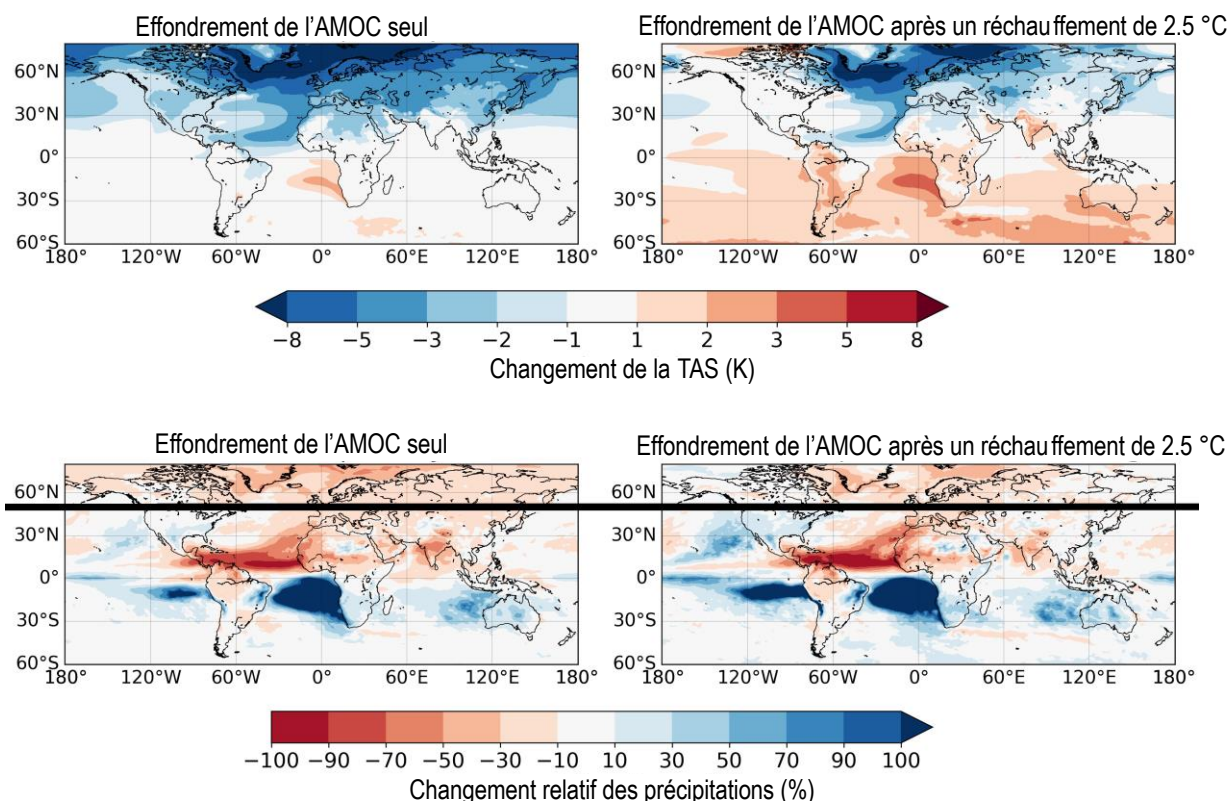
Température de l'air en surface et précipitations

Un effondrement de l'AMOC seul (sans réchauffement sous-jacent) entraînerait des impacts climatiques de grande ampleur au niveau mondial (Jackson et al., 2015^[248] ; Mecking et al., 2016^[249]). La colonne de gauche du Graphique 3.16. indique les réponses des températures et des précipitations. Le cadre supérieur gauche montre qu'un effondrement de l'AMOC (sans réchauffement sous-jacent) provoquerait un refroidissement généralisé dans l'hémisphère Nord, avec des conséquences plus extrêmes dans les régions les plus au nord. Plus précisément, l'Europe connaîtrait une baisse de 3 °C à 8 °C de la température moyenne annuelle de l'air en surface. Pour sa part, l'Amérique du Nord enregistrait une baisse moins sévère de 1 °C à 3 °C. Il y aurait en revanche peu de changements de température dans l'hémisphère Sud – seulement une petite hausse de la température dans l'océan Atlantique au large de la côte sud-ouest de l'Afrique⁷.

Les anomalies équatoriales marquées des précipitations correspondent à un déplacement vers le sud de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) sous l'effet de l'effondrement de l'AMOC (Graphique 3.16., cadre inférieur gauche). La majeure partie de l'hémisphère Nord deviendrait plus sèche, à l'exception de l'Amérique du Nord, qui deviendrait légèrement plus humide en moyenne. L'Inde perdrait plus de la moitié de ses précipitations actuelles en cas d'effondrement de l'AMOC. S'ensuivraient d'importantes perturbations de la mousson d'été indienne, qui affecteraient les moyens de subsistance de millions de

personnes ainsi que l'économie régionale (Gadgil et Gadgil, 2006^[250]). Le cadre inférieur gauche du Graphique 3.16 fait également apparaître un assèchement important dans le bassin amazonien.

Graphique 3.16. Réponse de la température de l'air en surface et des précipitations à un effondrement de l'AMOC seul et à un effondrement de l'AMOC après un réchauffement de 2.5 °C par rapport à l'ère préindustrielle



Note : Réponse de la température de l'air en surface (TAS, ligne du haut) et des précipitations (ligne du bas) aux scénarios d'effondrement de l'AMOC. Dans la colonne de gauche, les impacts climatiques d'un effondrement de l'AMOC seul, sans le réchauffement climatique supplémentaire le plus susceptible d'accompagner un effondrement de l'AMOC dans tout scénario futur réaliste, sont isolés. Pour analyser les impacts isolés d'un effondrement de l'AMOC, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2. Dans la colonne de droite, l'analyse est étendue de manière à intégrer les impacts d'un effondrement de l'AMOC en présence d'un état climatique futur plus réaliste. Elle tient compte des effets supplémentaires du réchauffement climatique en appliquant le scénario futur SSP1-2.6 du modèle HadGEM3-GC31-MM. Le scénario de forçage SSP1-2.6 fait référence à la trajectoire socio-économique partagée SSP1 et à la trajectoire de concentration régionale RCP2.6 – trajectoire à émissions faibles et à durabilité élevée. Pour le scénario SSP1-2.6, HadGEM3-GC31-MM parvient à un réchauffement climatique moyen de 2.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin de ce siècle (2071-2100). On superpose ce réchauffement aux impacts d'un effondrement de l'AMOC pour déterminer l'impact global dans l'éventualité où l'AMOC s'effondrerait à la suite d'un réchauffement de 2.5 °C par rapport au climat actuel (2006-35).

La colonne de gauche du Graphique 3.16. met en évidence les impacts directs d'un effondrement de l'AMOC seul. Inversement, la colonne de droite représente les impacts obtenus dans le scénario plus réaliste d'un effondrement de l'AMOC après un réchauffement de 2.5 °C par rapport au climat actuel (voir Annex 3.A). En superposant ce réchauffement (cadre supérieur droit), on observe des réponses de température contrastées entre les hémisphères Nord et Sud. L'hémisphère Nord présente encore un refroidissement généralisé (en particulier sur l'Atlantique Nord), mais celui-ci est en partie atténué par le réchauffement sous-jacent.

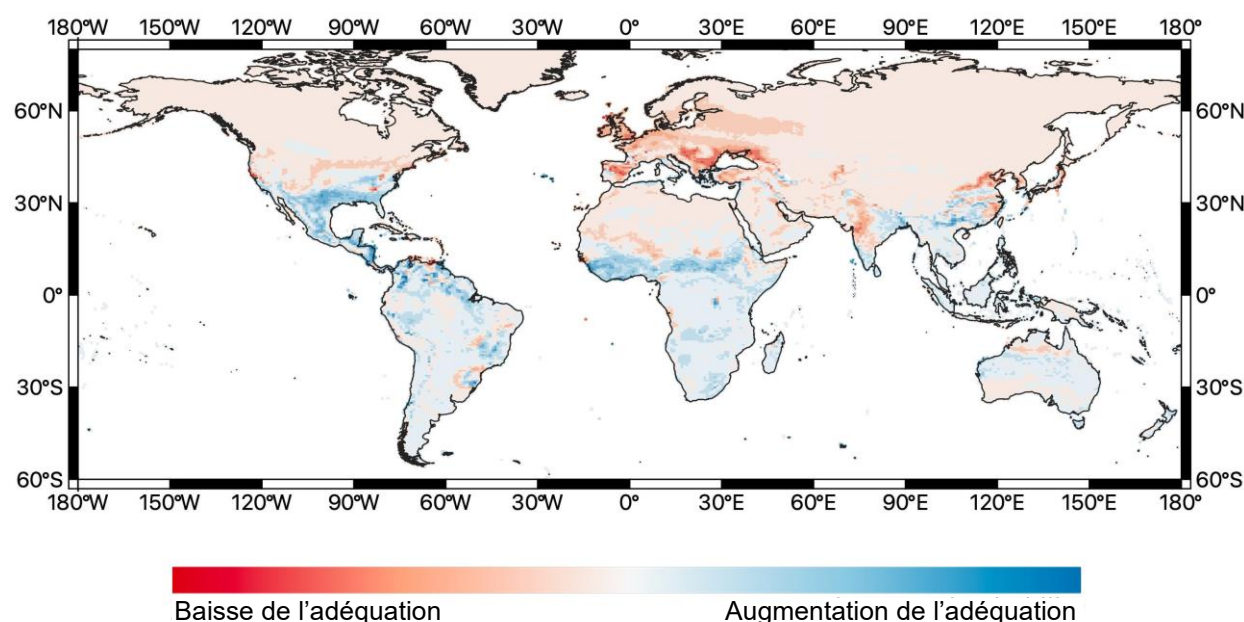
À l'inverse, l'hémisphère Sud continue de subir un réchauffement généralisé dû au réchauffement tendanciel sous-jacent, très peu affecté par l'effondrement de l'AMOC. Fait intéressant, les régimes pluviométriques et l'ampleur des anomalies sont pratiquement inchangés par rapport au scénario de l'effondrement de l'AMOC seul. Les principales différences sont un assèchement moindre en Asie mais un assèchement plus important dans les tropiques atlantiques lorsque l'AMOC s'effondre après un réchauffement de 2.5 °C.

Niche climatique

Xu et al. (2020_[251]) donnent une illustration des impacts d'un effondrement de l'AMOC sur « l'adéquation » du climat pour les humains. Cette étude montre que les humains, comme toutes les espèces, ont une « niche climatique apparente ». Dans cette niche, la densité démographique atteint un pic (à la fois aujourd'hui et à différents moments dans le passé). La niche climatique se caractérise par un mode majeur centré sur une température annuelle moyenne (TAM) d'environ 11 °C à 15 °C et des précipitations annuelles moyennes (PAM) d'environ 1 000 mm, avec un mode secondaire à environ 25 °C (Xu et al., 2020_[251]). De nombreux autres facteurs sociaux influent sur la densité de la population humaine. En outre, la répartition de la densité démographique en fonction du climat est remarquablement homogène au fil des millénaires (Xu et al., 2020_[251]). Cela pourrait traduire en partie un effet de la contingence historique – les gens vivent simplement là où d'autres ont vécu auparavant. Cependant, la production alimentaire dépend indubitablement du climat. De plus, la densité de la production végétale et de l'élevage par rapport au climat est étonnamment similaire à la densité démographique (Xu et al., 2020_[251]).

Comme indiqué plus haut, l'effondrement ou l'affaiblissement de l'AMOC entraînerait des changements de température et de précipitations, qui déplaceraient la position géographique de la niche climatique apparente pour les humains. Précédemment, Xu et al. (2020_[251]) ont examiné l'effet du réchauffement climatique sur le déplacement de la niche climatique apparente. L'analyse présentée ici considère les effets d'un effondrement de l'AMOC pris isolément et combiné au réchauffement climatique. La distribution préindustrielle de la densité démographique est utilisée comme base de référence pour construire la niche climatique humaine. La somme des distributions de la densité démographique par rapport à la TAM et aux précipitations est supposée être égale à un, de manière à fournir une mesure normalisée.

Graphique 3.17. Modélisation du changement de la niche climatique humaine suite à un effondrement simulé de l'AMOC



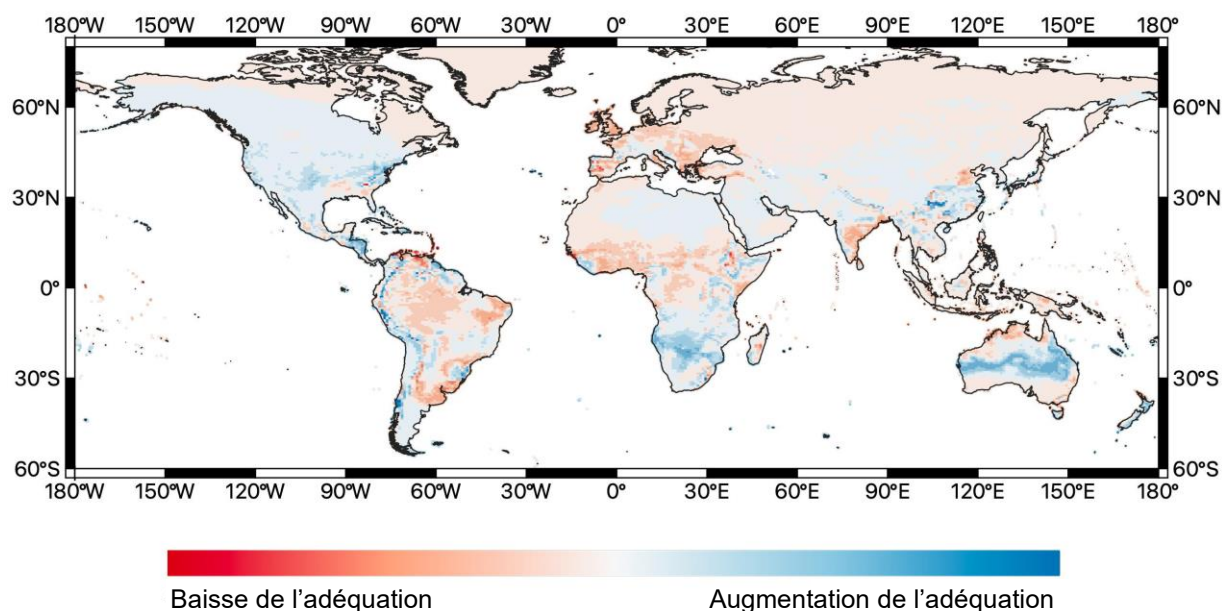
Note : Impacts isolés de l'effondrement de l'AMOC sans réchauffement supplémentaire. Il s'agit d'une simulation théorique, dans la mesure où un réchauffement supplémentaire serait nécessaire pour déclencher l'effondrement de l'AMOC. Le changement de la niche climatique humaine est présenté sous la forme de la différence entre la niche climatique calculée pour le passage de contrôle AMOC en mode « marche » et la niche climatique après l'effondrement simulé de l'AMOC. Le scénario de contrôle est représentatif d'un monde préindustriel. Pour calculer les niches climatiques, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2.

On calcule ensuite les changements dans « d'adéquation » du climat sous la forme de proportions des gains ou pertes de niche additionnés. Puis on cartographie « l'adéquation » globale pour les populations humaines, en mode « marche » et en mode « arrêt » de l'AMOC (Graphique 3.17). Le déplacement géographique projeté des conditions « adéquates » est très important. Les conditions se détériorent dans certaines régions mais s'améliorent dans d'autres (Graphique 3.17). Les régions situées au sud de l'équateur deviendraient en majorité plus « adéquates ». L'Afrique subsaharienne, ainsi que l'Amérique centrale et du Sud, enregistraient les « gains d'adéquation » les plus élevés. Inversement, l'effondrement de l'AMOC entraînerait un recul de « l'adéquation » dans l'hémisphère Nord – en Europe, aux États-Unis et en Afrique du Nord.

La trajectoire à faibles émissions de carbone SSP1-2.6 implique un réchauffement climatique moyen de 2.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle. Lorsque ces impacts sont ajoutés à ceux de l'effondrement de l'AMOC, quelques différences marquées apparaissent par rapport à l'effet de l'effondrement de l'AMOC seul. L'Europe, région la plus influencée par l'effet de réchauffement et les précipitations amenées par le Gulf Stream, enregistrerait le plus fort recul de son « adéquation » climatique. Tandis que l'Amérique du Nord deviendrait pour l'essentiel plus « adéquate », de vastes pans de l'Amérique du Sud, en particulier le Brésil, deviendraient moins adéquats. Le déclin de l'adéquation climatique du Brésil résulte principalement de deux facteurs : la modification des régimes pluviométriques et l'effet du réchauffement climatique, encore amplifié par l'effondrement de l'AMOC dans l'hémisphère Sud. Une grande partie de l'Afrique ne connaîtrait qu'une légère augmentation ou diminution de son adéquation. Cependant, lorsque l'on tient compte du réchauffement, le tableau change radicalement pour l'Afrique centrale. Dans cette région, la trajectoire de réchauffement SSP1-2.6 entraînerait une diminution

de l'adéquation. Cet effet est amplifié par le réchauffement de l'hémisphère Sud dû à l'effondrement de l'AMOC (Graphique 3.18).

Graphique 3.18. Modélisation du changement de la niche climatique humaine suite à un effondrement simulé de l'AMOC après un réchauffement de 2.5 °C par rapport aux températures préindustrielles, selon le scénario SSP1-2.6



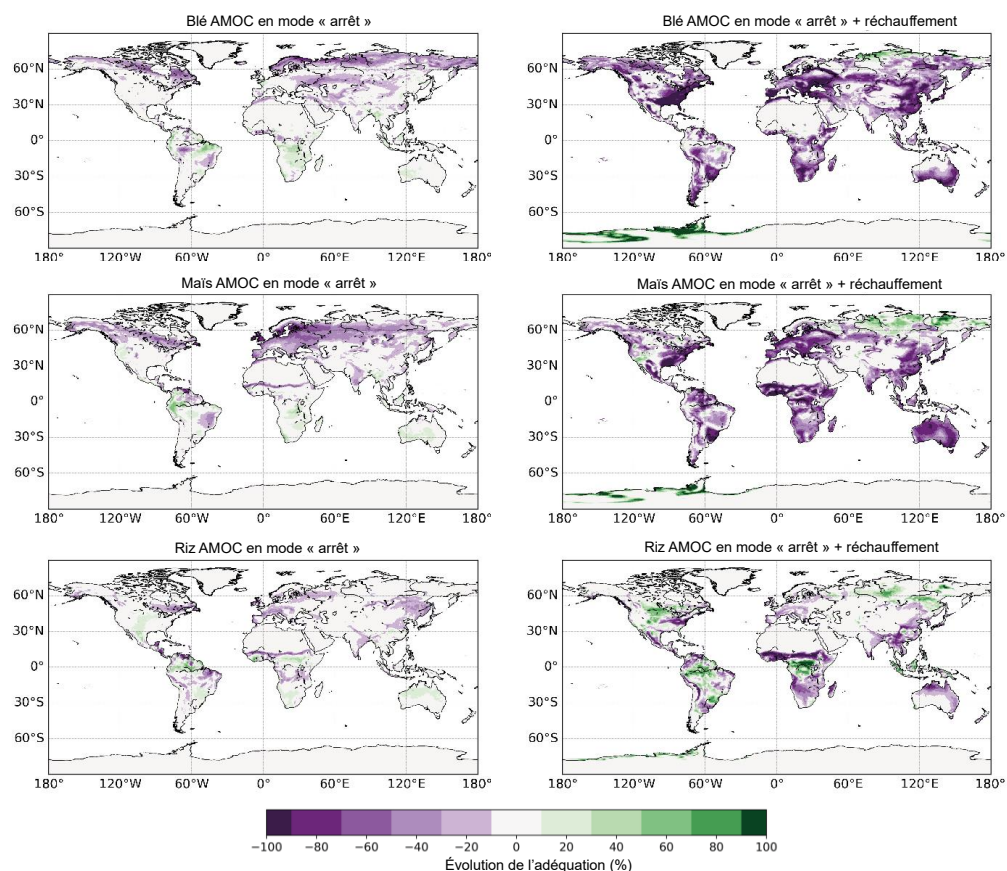
Note : Impacts sur l'adéquation du climat pour les populations humaines dans un scénario plus réaliste supposant que l'effondrement de l'AMOC est déclenché par un réchauffement de 2.5 °C par rapport à l'ère préindustrielle (scénario SSP1-2.6). Le changement de la niche climatique humaine est présenté sous la forme de la différence entre la niche climatique calculée pour le passage de contrôle AMOC en mode « marche » et la niche climatique après l'effondrement simulé de l'AMOC. Le scénario de contrôle est représentatif d'un monde préindustriel. Pour calculer les niches climatiques, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt », une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2. Les effets de l'effondrement de l'AMOC sont superposés aux effets supplémentaires du réchauffement climatique correspondant au passage du scénario SSP1-2.6 dans le modèle HadGEM3-GC31-MM. Le scénario de forçage SSP1-2.6 fait référence à la trajectoire socio-économique partagée SSP1 et à la trajectoire de concentration régionale RCP2.6 – trajectoire à émissions faibles et à durabilité élevée. Dans le scénario SSP1-2.6, le modèle HadGEM3-GC31-MM parvient à un réchauffement climatique moyen de 2.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle (2071-2100). On superpose ce réchauffement aux impacts d'un effondrement de l'AMOC pour déterminer l'impact global dans l'éventualité où l'AMOC s'effondrerait à la suite d'un réchauffement de 2.5 °C par rapport au climat actuel (2006-35).

Cette approche séduit par sa simplicité mais comporte naturellement des limites. Si la réussite des sociétés humaines est liée de manière complexe au climat (Carleton et Hsiang, 2016^[252]), le climat ne peut à lui seul prédire quelles sociétés vont prospérer et où. En outre, les populations installées dans un lieu donné sont historiquement adaptées au climat. En fait, les changements, par eux-mêmes, suscitent des défis, même si le climat devient théoriquement plus adéquat dans un endroit particulier. Le déplacement géographique de la niche climatique humaine décrit ici ne doit donc pas être interprété comme une prévision des migrations humaines ou d'une baisse de la capacité des humains à prospérer dans une région particulière. Il illustre les répercussions de grande ampleur qui pourraient découler d'un effondrement de l'AMOC, à la fois isolément et dans le contexte d'un scénario de réchauffement climatique.

Effet sur l'agriculture

Cette sous-section utilise une approche fondée sur les « niches » plus détaillée pour évaluer les effets de l'effondrement de l'AMOC sur l'adéquation du climat pour les principales cultures de base que sont le blé, le maïs et le riz. Le blé, le maïs et le riz fournissent plus de 50 % des calories consommées au niveau mondial (FAOSTAT, 2021^[253]). L'aptitude à la croissance de ces cultures est évaluée à l'aide des données EcoCrop sur la température et les précipitations optimales et la durée de la saison de croissance. Un lieu est considéré comme propice à la croissance d'une culture pour une année donnée s'il présente une température et des précipitations comprises dans les limites EcoCrop pour la durée de la saison de croissance de la culture en question. On examine la proportion de 150 années qui présente un climat adapté à la croissance des cultures pour la durée de la saison de croissance. On procède ensuite de la même manière pour le passage AMOC en mode « arrêt », puis le passage AMOC en mode « arrêt » avec réchauffement supplémentaire. L'analyse montre qu'un effondrement de l'AMOC réduit l'adéquation à la culture du blé, même s'il existe des zones qui deviennent plus adaptées à cette culture (voir Graphique 3.19 et Graphique 3.20). L'adéquation à la culture du maïs décline en Europe et en Russie ainsi qu'aux hautes latitudes de l'Amérique du Nord, mais augmente dans certaines régions de l'Amérique du Sud, en Afrique australe et en Australie. L'évolution de l'adéquation à la culture du riz suit un schéma similaire, mais sur une zone plus restreinte.

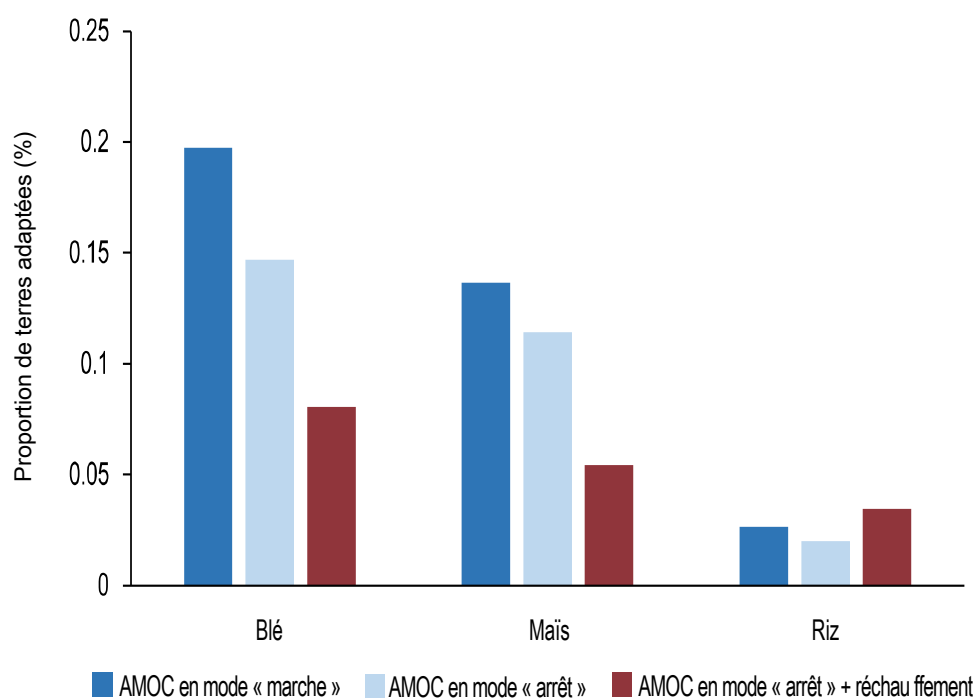
Graphique 3.19. Différences dans l'adéquation à la culture du blé, du maïs et du riz entre les scénarios AMOC en mode « marche », AMOC en mode « arrêt » et AMOC en mode « arrêt » avec réchauffement supplémentaire



Note : Les différences indiquées ici correspondent à l'adéquation dans le scénario AMOC en mode « marche » (pourcentage) diminuée de l'adéquation dans le scénario AMOC en mode « arrêt » ou dans le scénario AMOC en mode « arrêt » avec réchauffement.

Pour représenter ces changements de façon synthétique, on calcule le pourcentage de terres qui présenteraient une adéquation supérieure à 90 % dans chacun des trois cas (voir Graphique 3.19 et Graphique 3.20). Dans le scénario AMOC en mode « arrêt » sans réchauffement, environ 5 % des terres deviennent impropres à la culture du blé. Cela correspond à une perte de près d'un quart de la superficie adéquate actuelle. De l'ordre de 2 % des terres deviennent impropres à la culture du maïs (soit une perte de 16 % de la superficie actuellement adéquate). Les changements sont moins importants pour le riz. Si l'on tient compte du changement climatique, la moitié environ des terres adéquates restantes deviennent impropres à la culture du blé et du maïs. Pour le riz, on constate une augmentation modeste de la superficie adéquate, qui devient plus vaste que dans la situation de référence. Cependant, les gains de surfaces adaptées à la culture du riz sont éclipsés par les pertes de surfaces adaptées à la culture du blé et du maïs. Dans cette analyse, on ne superpose pas le sous-ensemble de zones où chacune des trois cultures est effectivement pratiquée. Il est cependant incontestable qu'un effondrement de l'AMOC compromettrait gravement la sécurité alimentaire. Combiné au changement climatique, il aurait des conséquences catastrophiques.

Graphique 3.20. Diagramme indiquant le pourcentage de l'ensemble des mailles de la trame des terres qui est adapté à la culture du blé, du maïs et du riz dans chaque simulation



Note : Sur ce diagramme, un lieu est considéré comme adapté à la croissance d'une culture si plus de 90 % des 150 années analysées le sont, comme le texte principal l'explique en détail. AMOC en mode « arrêt » désigne le mode « arrêt » de l'AMOC sans réchauffement.

Analogues climatiques

Les changements induits par un effondrement ou un ralentissement de l'AMOC peuvent également être quantifiés. On peut en déterminer un certain nombre en comparant le climat prévu de certaines grandes villes au climat actuel, de manière à établir des analogues climatiques (Tableau 3.4). La technique statistique des « analogues climatiques » consiste à quantifier la similitude du climat d'un lieu déterminé par rapport au climat d'un autre lieu et/ou d'une autre époque. Cette similitude est calculée en utilisant les

valeurs mensuelles moyennes des températures et des cumuls de précipitations. Les 14 villes sélectionnées pour l'analyse par analogues climatiques s'orientent globalement vers des climats plus froids. L'impact est beaucoup plus marqué pour les villes de l'hémisphère Nord que pour celles de l'hémisphère Sud. Les villes européennes sont plus touchées que les villes nord-américaines et connaissent un degré élevé de refroidissement.

Lorsque le réchauffement du scénario SSP1-2.6 est pris en compte, certaines villes évoluent vers des analogues plus chauds. À l'inverse, dans le scénario ne considérant que l'effondrement de l'AMOC, toutes les villes examinées s'orientent vers des climats plus froids. Néanmoins, de nombreuses villes présentent un changement climatique analogue dans les scénarios avec et sans réchauffement. Cela est dû en grande partie à l'influence des changements des précipitations, pour lesquels l'influence de l'AMOC est dominante.

Tableau 3.4. Analogues climatiques correspondant aux effets isolés d'un effondrement simulé de l'AMOC pour 14 grandes villes

Passage de contrôle, AMOC en mode « marche »			Analogue – effondrement de l'AMOC		
Ville	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{mm an}^{-1})$	Ville la plus proche	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{mm an}^{-1})$
Amsterdam	10.3	798.0	Îles Aléoutiennes, Alaska, États-Unis	6.0	725.9
Bangkok	29.0	889.4	Addis-Abeba, Éthiopie	28.2	890.7
Berlin	9.3	651.2	Stockholm, Suède	5.6	534.9
Le Cap	18.0	551.7	Le Cap, Afrique du Sud	18.9	813.8
Istanbul	14.7	963.0	Gand, Bruxelles	11.5	773.1
Londres	10.4	717.1	Îles Aléoutiennes, Alaska, États-Unis	6.1	607.4
Miami	24.5	1 135.7	Jacksonville, Floride, États-Unis	23.5	1 191.8
Nairobi	20.1	1 228.6	Nairobi, Kenya	20.0	1 339.6
New York	12.1	1 562.3	Providence, Rhode Island, États-Unis	10.3	1 617.4
Paris	10.8	748.5	Copenhague, Danemark	7.2	626.1
Rio de Janeiro	23.3	1 258.2	Rio de Janeiro, Brésil	22.8	1 341.3
San Francisco	16.2	1 291.1	San Francisco, Californie, États-Unis	14.9	1 401.5

Note : Les analogues climatiques sont calculés à l'aide d'un modèle statistique qui quantifie la similitude des climats sur la base des températures et des taux de précipitations mensuels moyens. Pour calculer les analogues, on compare le climat de la ville cible dans le passage AMOC en mode « arrêt » avec le climat des villes dans le passage de contrôle (AMOC en mode « marche »), de manière à déterminer un analogue AMOC en mode « marche » pour chaque ville cible dans le scénario d'effondrement de l'AMOC. On obtient ainsi un ensemble de coordonnées pour l'analogue climatique le plus proche. La ville analogue retenue est la grande ville la plus proche parmi l'ensemble des coordonnées analogues. Les températures indiquées sont les températures annuelles moyennes pour chaque ville cible pour le passage de contrôle et pour les analogues dans le passage AMOC en mode « arrêt ». Les précipitations indiquées sont les cumuls de précipitations annuels moyens pour chaque ville cible pour le passage de contrôle et pour les analogues dans le passage AMOC en mode « arrêt ».

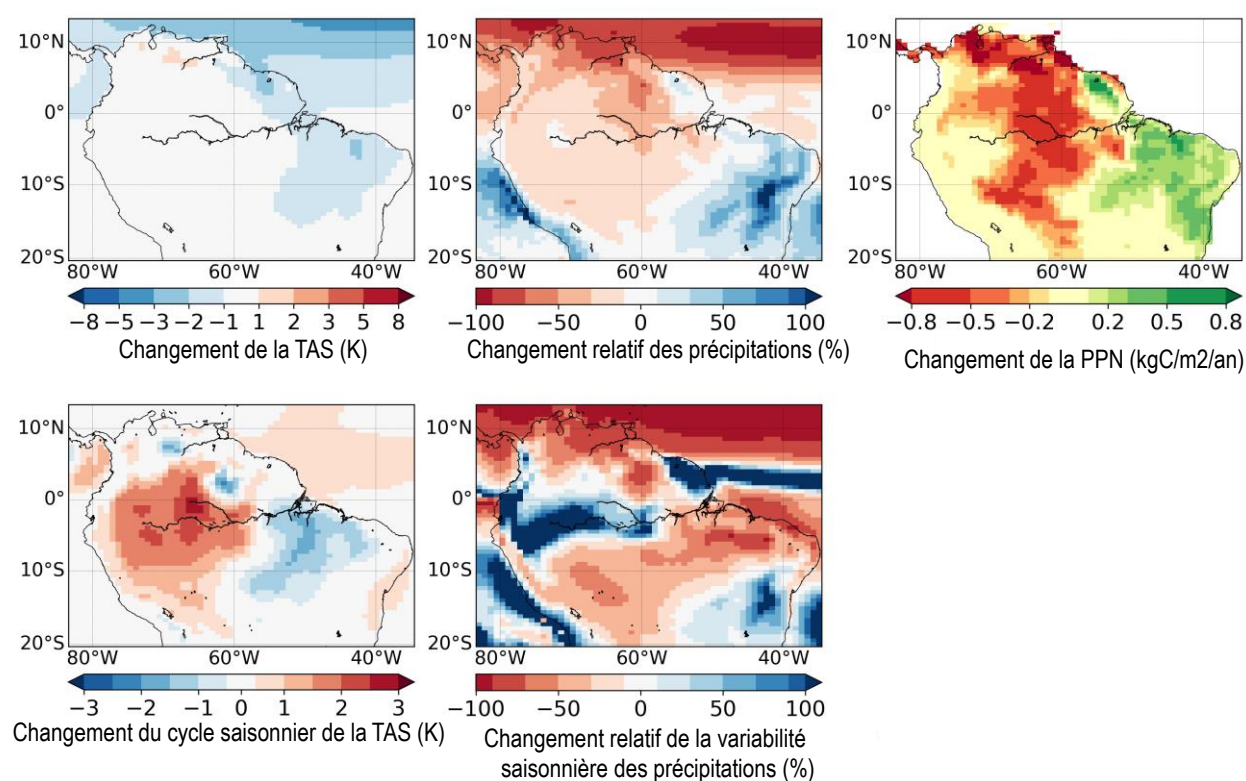
Effets en cascade potentiels – franchissement d'autres points de basculement

L'AMOC étant le « grand ordonnateur » du système climatique, son effondrement pourrait déclencher des franchissements de points de basculement en cascade (Wunderling et al., 2021^[69]). Cette sous-section examine l'impact d'un effondrement de l'AMOC sur d'autres éléments basculants reconnus, à savoir la forêt tropicale amazonienne, les forêts boréales et les régimes de mousson de l'Inde et de l'Afrique de l'Ouest [pour l'effet sur l'ENSO, voir Williamson et al. (2017^[254])].

Forêt tropicale amazonienne

L'effondrement de l'AMOC aurait des effets en cascade sur la forêt tropicale amazonienne, dont on pense qu'elle pourrait constituer un autre point de basculement climatique (Lenton et al., 2008^[4]). Le dépérissement de cette forêt aurait des répercussions mondiales en raison de la perte de stockage du carbone, ainsi que d'autres considérations telles que le déclin de la biodiversité et la modification des régimes pluviométriques (Cox et al., 2004^[255]). Comme on l'a vu précédemment, des changements climatiques peuvent être observés dans le bassin amazonien. Plus particulièrement, le déplacement de la ZCIT a entraîné un déplacement des précipitations vers le sud. La sous-section qui suit examine plus en détail les effets potentiels de ce changement sur la forêt tropicale.

Graphique 3.21. Impacts d'un effondrement de l'AMOC sur la forêt tropicale amazonienne

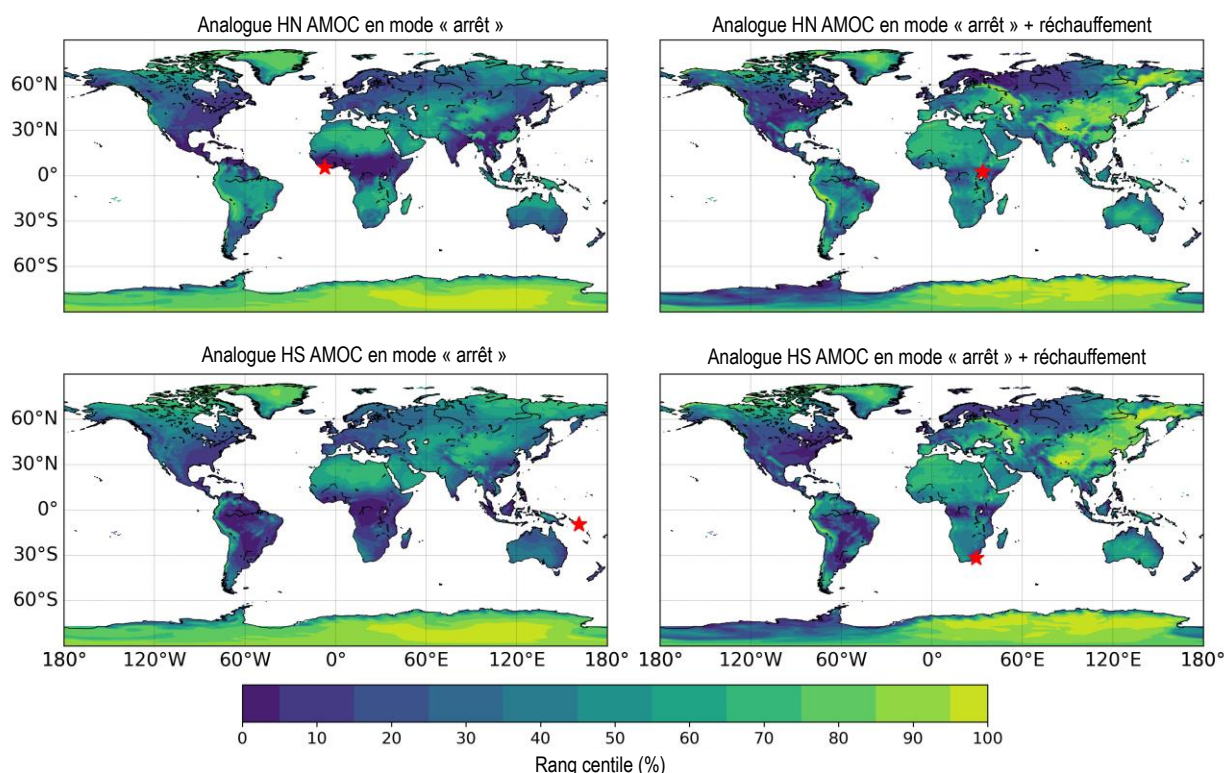


Note : Les impacts climatiques sur la forêt tropicale amazonienne d'un effondrement de l'AMOC, sans le réchauffement climatique supplémentaire le plus susceptible d'accompagner un effondrement de l'AMOC dans tout scénario futur réaliste, sont isolés. Pour analyser les impacts isolés d'un effondrement de l'AMOC, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2. Les impacts climatiques comprennent l'anomalie de la température de l'air en surface (TAS, colonne de gauche) (en haut) et l'anomalie de l'amplitude du cycle saisonnier (en bas) ; l'anomalie des précipitations (colonne du milieu) (en haut) et le changement de la variabilité saisonnière (en bas) ; et l'anomalie de 8 °C (productivité primaire nette, à droite).

Le Graphique 3.21 indique l'impact d'un effondrement de l'AMOC seul sur la forêt tropicale amazonienne, en l'absence de tout réchauffement tendanciel sous-jacent. Bien que la température moyenne annuelle de l'air en surface dans le bassin amazonien change peu, le cycle saisonnier des températures augmente dans une proportion allant jusqu'à 2 °C après un effondrement de l'AMOC. En outre, les précipitations diminuent dans des proportions allant jusqu'à 50 %, de même que leur variabilité saisonnière. Ces changements ont pour corollaire une extension de la saison sèche combinée à des températures plus extrêmes, qui provoqueraient à terme un dépérissement à grande échelle. Bien qu'il n'y ait pas de végétation dynamique dans la simulation effectuée avec le modèle⁸, la productivité primaire nette (PPN) laisse penser qu'un basculement conduisant au dépérissement de la forêt amazonienne est probable. Plus spécifiquement, la PPN diminue de plus de 0.5 kgC/m²/an dans une grande partie de l'Amazonie. La baisse avoisine même 1kgC/m²/an dans les régions du nord de l'Amazonie. En revanche, la PPN augmente à l'est de l'Amazonie, principalement en raison de précipitations plus importantes et d'une légère baisse de la température moyenne annuelle dans la région.

On analyse l'analogie climatique de l'AMOC pour tenter de déterminer quel type de végétation l'on trouverait en Amazonie après un effondrement de l'AMOC. À cette fin, on examine les mailles de la grille des terres du passage AMOC en mode « marche » qui correspondent le mieux aux cycles annuels moyens des précipitations et des températures dans le bassin amazonien. En raison de l'inversion de la saisonnalité de part et d'autre de l'équateur, l'analyse est effectuée séparément pour les hémisphères Nord et Sud.

Graphique 3.22. Analyse des analogues climatiques pour la température et les précipitations, pour les parties du bassin amazonien situées dans l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud respectivement



Note : Analyse des analogues climatiques pour la température et les précipitations, pour les parties du bassin amazonien situées dans l'hémisphère Nord (HN, ligne du haut) et l'hémisphère Sud (HS, ligne du bas) ; HN : hémisphère Nord ; HS : hémisphère Sud. Les étoiles rouges représentent le climat le plus proche du climat du bassin amazonien HN/HS pour l'AMOC en mode « marche ».

Le Graphique 3.22 illustre l'analyse des analogues climatiques pour l'hémisphère Nord (en haut) et l'hémisphère Sud (en bas) dans le cas d'un effondrement de l'AMOC seul (à gauche) et d'un effondrement de l'AMOC combiné au changement climatique (à droite). Les couleurs plus foncées correspondent aux mailles de la grille dans lesquelles le climat AMOC en mode « marche » est plus proche du climat AMOC en mode « arrêt » dans le bassin amazonien, l'étoile rouge indiquant le climat le plus proche dans chaque cas. Dans le cas de l'effondrement de l'AMOC seul, la température en Amazonie ne change pas beaucoup, mais les régimes de précipitations sont très différents.

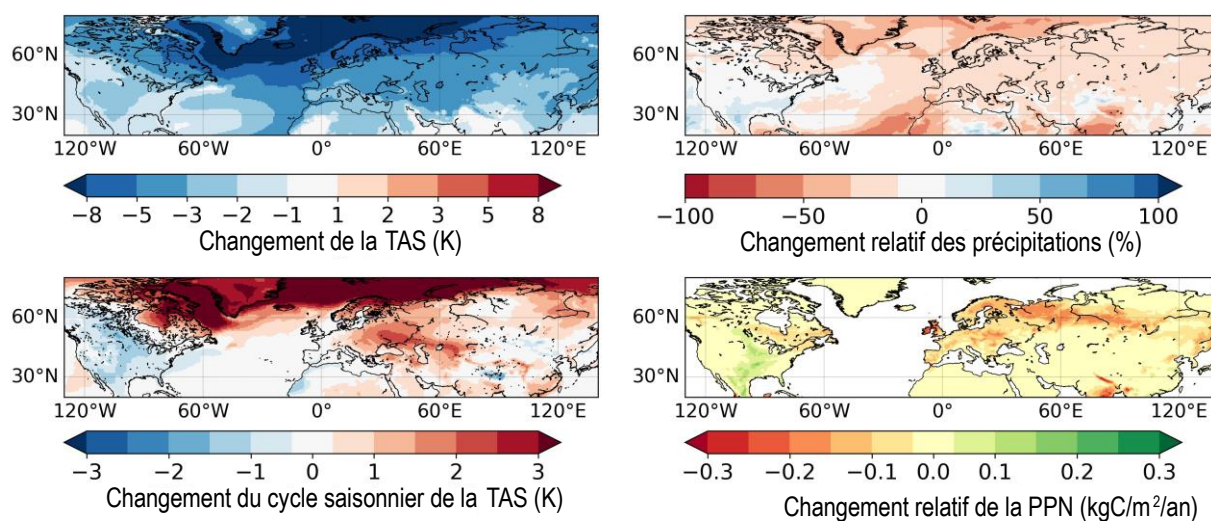
En combinant les effets décrits ci-dessus, cette analyse montre que le Sahel est l'analogue climatique le plus proche pour l'hémisphère Nord, et les Îles Salomon pour l'hémisphère Sud. Lorsque l'effondrement de l'AMOC est combiné au changement climatique futur, la configuration générale du classement des analogues climatiques reste globalement similaire. Cependant, l'analogue le plus proche se déplace en Afrique de l'Est pour l'Amazonie de l'hémisphère Nord et en Afrique du Sud pour l'Amazonie de l'hémisphère Sud. Cette analyse confirme les déductions faites plus haut, à savoir que le biome serait transformé et cesserait d'être celui d'une forêt tropicale humide.

Forêts boréales

Les forêts boréales d'Amérique du Nord et du nord de l'Europe et de l'Asie éliminent le carbone de l'atmosphère et contribuent à limiter le réchauffement climatique. Dans le scénario d'effondrement de l'AMOC sans réchauffement sous-jacent (Graphique 3.23), les forêts boréales d'Europe et d'Asie réagissent différemment de celles d'Amérique du Nord. Comme indiqué précédemment, l'hémisphère Nord connaît un refroidissement généralisé, mais le refroidissement est plus marqué en Europe et en Asie qu'en Amérique du Nord. L'amplitude du cycle saisonnier augmente en Europe et en Asie, ce qui se traduit par un refroidissement plus important des températures hivernales que des températures estivales. Inversement, l'amplitude du cycle saisonnier diminue en Amérique du Nord, ce qui entraîne des impacts plus importants sur les températures estivales.

Pour les précipitations également, on observe des réponses opposées entre les deux régions. L'Europe et l'Asie subiraient un assèchement généralisé, tandis que les précipitations augmenteraient en Amérique du Nord. Il en résulterait un impact négatif sur la PPN des forêts boréales d'Europe et d'Asie et donc un risque de basculement. Dans l'est du Canada, la PPN diminue également, mais la productivité augmente plus au sud aux États-Unis. Cela laisse supposer l'existence d'un effet stabilisateur sur les forêts boréales et la possibilité d'une progression vers le sud.

Graphique 3.23. Impacts potentiels d'un effondrement de l'AMOC sur les forêts boréales



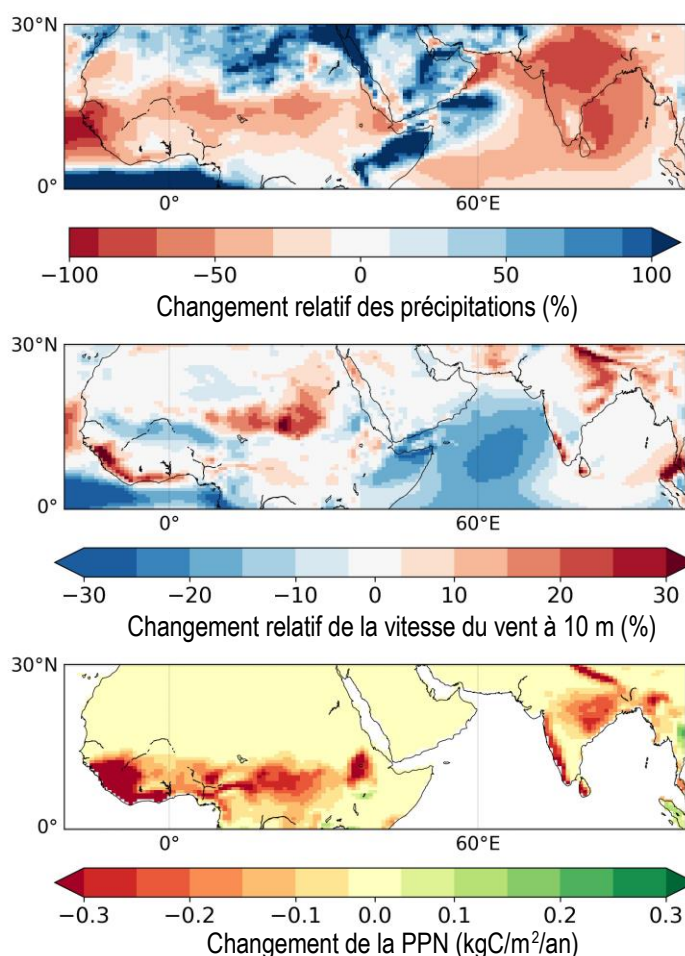
Note : Les impacts climatiques sur les forêts boréales d'un effondrement de l'AMOC, sans le réchauffement climatique supplémentaire le plus susceptible d'accompagner un effondrement de l'AMOC dans tout scénario futur réaliste, sont isolés. Pour analyser les impacts isolés d'un effondrement de l'AMOC, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2. Les impacts climatiques comprennent l'anomalie de la température de l'air en surface (colonne de gauche) (en haut) et l'anomalie de l'amplitude du cycle saisonnier (en bas) ; le changement relatif des précipitations (en haut à droite) ; et l'anomalie de la productivité primaire nette (PPN, en bas à droite).

Régimes de mousson

La mousson d'été indienne s'explique principalement par le phénomène suivant : pendant l'été, la terre se réchauffe plus vite que l'océan, créant un gradient de température qui engendre des vents. Lorsque ces vents, qui prennent naissance dans l'océan Indien, arrivent sur les terres, l'humidité qu'ils renferment tombe sous forme de précipitations. Les précipitations libèrent la chaleur latente, qui augmente la température sur les terres et amplifie ainsi les vents de mousson (Levermann et al., 2009^[256]). La mousson africaine est renforcée lorsque l'insolation estivale dans l'hémisphère Nord est élevée (Rossignol-Strick, 1985^[257]). L'effondrement de l'AMOC entraînerait une baisse des températures dans l'hémisphère Nord et donc un affaiblissement de la mousson africaine.

Le Graphique 3.24 indique qu'un effondrement de l'AMOC seul perturberait la mousson d'été indienne et la mousson africaine. La vitesse des vents d'été (juin-juillet-août, JJA) sur l'océan Indien et l'Atlantique Ouest sera considérablement réduite. Par conséquent, les vents plus faibles venant des océans transporteront moins d'humidité, d'où une diminution importante des précipitations estivales sur les terres – dans le nord de l'Inde, les précipitations estivales diminueront de plus de 70 %. Des vents plus faibles et des précipitations moins abondantes auront également un effet négatif sur la productivité, ce qui retentira sur la capacité des agriculteurs à produire des cultures. De ce fait, une perturbation de la saison des moussons aurait des répercussions négatives sur les moyens de subsistance de millions de personnes.

Graphique 3.24. Impacts d'un effondrement de l'AMOC sur les moussons d'Afrique de l'Ouest et d'Inde en été (juin-juillet-août, JJA)



Note : Les impacts climatiques estivaux (juin-juillet-août, JJA) d'un effondrement de l'AMOC, sans le réchauffement climatique supplémentaire le plus susceptible d'accompagner un effondrement de l'AMOC dans tout scénario futur réaliste, sur les moussons d'Afrique de l'Ouest et d'Inde sont isolés. Pour analyser les impacts isolés d'un effondrement de l'AMOC, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire, produites par le modèle HadGEM3-GC2. Les impacts climatiques comprennent le changement relatif des précipitations (en haut) ; le changement relatif de la vitesse du vent à 10 m (au milieu) ; et l'anomalie de la productivité primaire nette (NPP, en bas).

3.6.3. Synthèse des résultats

Conséquences et impacts socio-économiques

Un affaiblissement marqué ou l'arrêt de l'AMOC et le changement climatique qui en résulterait auraient d'amples conséquences. Ce serait particulièrement le cas pour les masses terrestres autour de l'Atlantique Nord et les populations qui y vivent. Les changements climatiques induits par l'effondrement de l'AMOC (et le réchauffement climatique) auraient de multiples effets sur les écosystèmes ainsi que sur la santé humaine, les moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, l'approvisionnement en eau et la croissance économique. Ces changements sont résumés ci-après.

Chocs économiques

L'effondrement de l'AMOC pourrait entraîner une réduction substantielle de la production économique et exacerber les inégalités économiques dans le monde. Comme cela a été expliqué plus haut, un éventuel arrêt de l'AMOC aurait des répercussions mondiales sur « l'adéquation » du climat. Burke, Hsiang et Miguel (2015^[258]) ont montré que la productivité économique mondiale dépendait de façon non linéaire de la température. Ils ont observé un pic de productivité à une température moyenne annuelle de 13.6 °C. Ce résultat est comparable au pic de densité démographique identifié par Xu et al. (2020^[251]).

Cependant, utiliser une relation dérivée entre la température actuelle et la productivité actuelle ne permet pas de bien caractériser l'impact d'un effondrement de l'AMOC. En effet, cette relation ne tient compte que des activités économiques directement exposées aux conditions météorologiques (Keen et al., 2021^[259]). Plusieurs études ont adopté cette approche [par ex. (Tol, 2009^[260] ; Link et Tol, 2010^[261] ; Anthoff, Estrada et Tol, 2016^[262])]. Elles se focalisent uniquement sur le changement global des températures dû au réchauffement climatique et à l'effondrement de l'AMOC combinés. Or, l'un de ces phénomènes suivrait l'autre, et chacun produirait ses propres impacts. De nombreux impacts sont associés à des changements d'aspects du climat autres que la température, notamment le cycle de l'eau.

Certaines études soutiennent même que l'effondrement de l'AMOC produirait un avantage économique net. Pour les raisons exposées plus haut, cela ne semble pas plausible. D'autres travaux ont émis l'hypothèse que l'AMOC avait par le passé exercé une influence sur la concentration du pouvoir géopolitique et de la richesse dans la région de l'Atlantique Nord (Railsback, 2017^[263]). Toutefois, ce « déterminisme climatique » est largement contesté.

L'étude approfondie des impacts économiques potentiels de l'effondrement de l'AMOC (ou du franchissement de tout autre point de basculement climatique) ne met pas l'accent sur les effets théoriques du climat sur la productivité humaine, mais sur les facteurs physiques. En cas de franchissement de points de basculement, la configuration spatiale et les modes de variabilité temporelle du climat pourraient changer radicalement (Lenton et Ciscar, 2012^[70] ; Rodgers et al., 2021^[264]). Si des changements aussi radicaux devaient se produire, il ne servirait à rien de tirer des conclusions du schéma spatio-temporel actuel (auquel les sociétés ont eu des siècles pour s'adapter) (Keen et al., 2021^[259]).

Effet sur l'agriculture

L'effondrement de l'AMOC aurait un impact énorme sur l'agriculture dans le monde. Une grande partie de l'hémisphère Nord deviendrait moins adaptée à la croissance de nombreuses cultures de base. Toutefois, l'Europe serait particulièrement touchée. L'AMOC rend le climat européen plus chaud et plus humide qu'il ne le serait autrement. Si l'AMOC s'affaiblissait ou s'effondrait au cours de la prochaine décennie en raison de la poursuite du réchauffement, la saisonnalité en Europe augmenterait fortement. S'ensuivraient des hivers plus rigoureux et des étés plus chauds et plus secs.

Ce changement du climat européen réduirait la productivité agricole et rendrait la plupart des terres impropres à la culture. Par conséquent, le climat serait moins propice à la croissance du maïs et du blé (à l'exception du blé au Royaume-Uni), ce qui conduirait à une hausse des prix des denrées alimentaires. À l'inverse, l'hémisphère Sud deviendrait plus adapté à la croissance du riz. Ce serait notamment le cas en Asie du Sud-Est, où le riz fait partie des principales cultures de base produites dans la région. Toutefois, cette croissance n'est pas analysée dans le contexte d'une possible défaillance de la mousson asiatique, qui pourrait avoir des effets néfastes sur l'agriculture dans toute l'Asie.

Forêt tropicale amazonienne

Les modifications de la température à la surface de la mer et des régimes pluviométriques dans l'Atlantique tropical affecteront la stabilité de l'Amazonie. Des recherches antérieures sont parvenues à la conclusion que les processus de réchauffement climatique et d'effondrement de l'AMOC devraient avoir des effets

antagonistes sur les précipitations en Amazonie (Ciemer et al., 2021^[265]). L'étude concluait en outre que le basculement de l'AMOC du mode fort au mode faible pourrait exercer un effet stabilisateur sur la forêt amazonienne. Les données sur les changements des précipitations utilisées dans la présente analyse révèlent une diminution générale dans tout le bassin.

En ce qui concerne l'effet d'un effondrement de l'AMOC seul, Ciemer et al. (2021^[265]) observent une forte diminution des précipitations. Cette baisse n'est pas contrebalancée par les changements climatiques. Cependant, la végétation dynamique n'étant pas utilisée dans le modèle, des effets hydrologiques locaux ne sont pas à exclure. Si l'on se réfère aux analogues climatiques, qui tiennent compte de la température et des précipitations, la climatologie future de la région amazonienne correspond aux milieux de type savane ou prairie qui existent actuellement en Afrique. Par conséquent, la forêt tropicale se rétrécirait. La conversion de 40 % de la forêt tropicale amazonienne en savane entraînerait une perte de stockage du CO₂ dans la végétation d'environ 90 gigatonnes (Gt). Une conversion totale pourrait entraîner des pertes de stockage du CO₂ allant jusqu'à 255 Gt (Steffen et al., 2018^[224]).

Forêts boréales

À l'instar de la forêt tropicale amazonienne, les forêts boréales jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat terrestre en piégeant le carbone. Le dépérissement des forêts boréales enclenchera une transition vers des prairies steppiques, qui stockent moins de carbone que les forêts boréales (Koven, 2013^[266]). Par conséquent, le dépérissement des forêts boréales pourrait libérer plus de 100 Gt de CO₂ dans l'atmosphère (Steffen et al., 2018^[224]) et, ce faisant, amplifier encore le réchauffement climatique.

Cette analyse révèle qu'un effondrement de l'AMOC à lui seul entraînerait probablement un dépérissement des forêts boréales du nord de l'Europe et de l'Asie. En revanche, le renforcement de la forêt boréale en Amérique du Nord (qui abrite environ un tiers des forêts boréales de la planète) augmenterait le stockage du carbone (Steffen et al., 2018^[224]). Cependant, il n'y a pas de végétation dynamique dans le modèle. Si, en remplacement, on utilise la productivité primaire nette comme indicateur, il est difficile de déterminer l'impact global d'un effondrement de l'AMOC sur les forêts boréales.

Régimes de mousson

La mousson d'été indienne, qui se produit de mai à septembre, est déterminante pour l'économie et l'agriculture de l'Inde (Bhat, 2006^[267]). La mousson a été identifiée comme un élément basculant potentiel lié au changement climatique (Lenton et al., 2008^[4]). À l'aide d'un simple modèle en boîte appliqué à la mousson indienne, Zickfeld et al. (2005^[268]) concluent qu'une augmentation de l'albédo terrestre, via les émissions de soufre et/ou les changements d'utilisation des terres par exemple, pourrait perturber la mousson. Selon certains signes apparus durant la seconde moitié du XX^e siècle, la mousson pourrait être sur le déclin, les précipitations estivales s'amenuisant. Cette évolution s'est traduite par des sécheresses plus fréquentes (Ramanathan et al., 2005^[269]) et une diminution des récoltes de riz (Auffhammer, Ramanathan et Vincent, 2006^[270]). On estime que la grande sécheresse de 2002 (Bhat, 2006^[267]) a coûté au gouvernement indien 340 millions de dollars en programmes d'aide aux victimes de la sécheresse. Elle a également provoqué une augmentation du nombre de suicides parmi les agriculteurs (Liepert et Giannini, 2015^[271]). Un affaiblissement de la mousson d'été indienne consécutif à l'effondrement de l'AMOC serait très certainement préjudiciable aux récoltes de riz des agriculteurs indiens.

Cette analyse montre que, d'après les projections du réchauffement climatique, l'Afrique de l'Ouest est la région du monde qui enregistra les plus fortes baisses de précipitations. L'effondrement de l'AMOC exacerbera cet effet, perturbant la mousson africaine et réduisant encore les précipitations. Cela pourrait entraîner une sécheresse généralisée dans une grande partie de la région. Les faibles capacités d'adaptation au changement climatique de la région aggraveront le problème. Les taux de pauvreté étant élevés, les individus n'ont pas les moyens de se préparer ou de s'adapter au changement climatique en

cours. De plus, la gouvernance ne propose pas de solutions pour atténuer les effets négatifs du changement climatique.

Autres effets socio-économiques

En plus des impacts socio-économiques énumérés ci-dessus, l'effondrement de l'AMOC produirait d'autres effets d'entraînement :

- La baisse de la PPN océanique constatée dans le scénario d'effondrement de l'AMOC semble être liée à une réduction du transport des nutriments vers le nord-est au niveau du bassin des îles Féroé-Shetland, associée à une dérive nord-atlantique ralentie.
- L'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre 20-25 mm/an (Levermann et al., 2005^[272]).
- Aux abords des côtes européennes et nord-américaines, elle sera plus importante, allant jusqu'à 50 cm (Vellinga et Wood, 2007^[273] ; Levermann et al., 2009^[256]).
- D'après les calculs de Vousdoukas et al. (2020^[274]), la protection des terres et la relocalisation des populations en Europe nécessiteraient 1.4 milliard EUR supplémentaires par an.
- L'évolution des profils de température entraînera des changements de la demande et de la consommation d'énergie. Dans un scénario qui combine réchauffement climatique et effondrement de l'AMOC, certaines parties de l'Europe pourraient rester plus chaudes qu'à l'ère préindustrielle. Cependant, l'effet refroidissant exercé par l'AMOC en hiver l'emporterait sur le réchauffement climatique, refroidissant certaines régions jusqu'à des températures inférieures à celles de l'ère préindustrielle.

Le point de basculement potentiel étudié ici n'est que l'un des nombreux éléments du système terrestre qui pourraient produire cet effet. Des recherches récentes montrent que l'AMOC est à son niveau le plus faible depuis un siècle. Cependant, le dernier rapport d'évaluation du GIEC (AR6) table, avec un niveau de confiance moyen, sur le fait qu'il n'y aura pas d'effondrement brutal de l'AMOC avant 2100 (GIEC, 2021^[14]). Pourtant, cette éventualité ne peut être exclue.

Le ralentissement de l'AMOC est déjà palpable et va probablement se poursuivre. Les résultats présentés ici sont spécifiques au modèle et au scénario choisis ; pour effectuer une évaluation plus complète, il faudrait utiliser un ensemble de modèles. Malgré ces limites, les résultats concordent avec les recherches antérieures. Ils montrent que le franchissement du seuil de basculement de l'un des systèmes les plus importants de la planète pourrait être lourd de conséquences.

Le changement climatique est en train de remodeler la structure socio-économique mondiale, et ce processus ne va pas s'arrêter. Cela risque de retentir sur les progrès accomplis vers la réalisation des Objectifs de développement durable, de perturber le commerce mondial, d'amplifier les conflits sociaux et les inégalités et de compromettre la sécurité humaine. Des réductions rapides et importantes des émissions de GES sont nécessaires pour éviter que les seuils critiques du système climatique ne soient franchis.

Il est essentiel d'agir au niveau international pour mesurer et surveiller les principaux éléments basculants, notamment l'AMOC. Les pays auront ainsi le temps d'élaborer des stratégies (notamment des mesures d'adaptation et de prévention) pour faire face aux conséquences de ces changements brusques des systèmes climatiques.

Références

- Accord de Paris (2015), *15 décembre 2015*, Collection des traités des Nations Unies, exemplaires des Traités multilatéraux déposés auprès du Secrétaire général certifiés conformes - Chapitre XXVII.7.d, https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=fr (consulté le 28 avril 2020). [3]
- Acemoglu, D. et al. (2012), « The network origins of aggregate fluctuations », *Econometrica*, vol. 80/5, pp. 1977-2016, <http://dx.doi.org/10.3982/ecta9623>. [71]
- Aerts, J. et al. (2014), « Evaluating Flood Resilience Strategies for Coastal Megacities », *Science*, vol. 344/6183, pp. 473-475, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1248222>. [98]
- Allan, R. et B. Soden (2008), « Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes », *Science*, vol. 321/5895, pp. 1481-1484, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1160787>. [156]
- Allen, M. (2003), « Liability for climate change », *Nature*, vol. 421/6926, pp. 891-892, <http://dx.doi.org/10.1038/421891a>. [216]
- Allen, M. et W. Ingram (2002), « Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle », *Nature*, vol. 419/6903, pp. 224-232, <http://dx.doi.org/10.1038/nature01092>. [155]
- Andrijevic, M. et al. (2019), « Governance in socioeconomic pathways and its role for future adaptive capacity », *Nature Sustainability*, vol. 3/1, pp. 35-41, <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0405-0>. [214]
- Angéilil, O. et al. (2017), « On the nonlinearity of spatial scales in extreme weather attribution statements », *Climate Dynamics*, vol. 50/7-8, pp. 2739-2752, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-3768-9>. [192]
- Angéilil, O. et al. (2014), « Attribution of extreme weather to anthropogenic greenhouse gas emissions: Sensitivity to spatial and temporal scales », *Geophysical Research Letters*, vol. 41/6, pp. 2150-2155, <http://dx.doi.org/10.1002/2014gl059234>. [179]
- Anthoff, D., F. Estrada et R. Tol (2016), « Shutting down the thermohaline circulation », *American Economic Review*, vol. 106/5, pp. 602-606, <http://dx.doi.org/10.1257/aer.p20161102>. [262]
- Appendini, C. et al. (2017), « On the role of climate change on wind waves generated by tropical cyclones in the Gulf of Mexico », *Coastal Engineering Journal*, vol. 59/2, pp. 1740001-1-1740001-32, <http://dx.doi.org/10.1142/s0578563417400010>. [54]
- Athanasίου, P. et al. (2019), « Global distribution of nearshore slopes with implications for coastal retreat », *Earth System Science Data*, vol. 11/4, pp. 1515-1529, <http://dx.doi.org/10.5194/essd-11-1515-2019>. [58]
- Auffhammer, M., V. Ramanathan et J. Vincent (2006), « Integrated model shows that atmospheric brown clouds and greenhouse gases have reduced rice harvests in India », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 103/52, pp. 19668-19672, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0609584104>. [270]

- Bamber, J. et al. (2019), « Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116/23, pp. 11195-11200, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1817205116>. [43]
- Bamber, J. et al. (2018), « Land ice freshwater budget of the Arctic and North Atlantic Oceans: 1. Data, methods, and results », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 123/3, pp. 1827-1837, <http://dx.doi.org/10.1002/2017jc013605>. [241]
- Banque mondiale (2021), *PIB par habitant (\$ US courants) - Données*, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD> (consulté le 2 juillet 2021). [84]
- Barker, S. et G. Knorr (2016), « A paleo-perspective on the AMOC as a tipping element », *Past Global Change Magazine*, vol. 24/1, pp. 14-15, <http://dx.doi.org/10.22498/pages.24.1.14>. [235]
- Barrett, S. et A. Dannenberg (2014), « On the sensitivity of collective action to uncertainty about climate tipping points », *Nature Climate Change*, vol. 4, pp. 36-39. [223]
- Barros, V. et al. (dir. pub.) (2014), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, USA, pp. 688. [88]
- Barthel, F. et E. Neumayer (2012), « A trend analysis of normalized insured damage from natural disasters », *Climatic Change*, vol. 113/2, pp. 215-237, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0331-2>. [123]
- Bellprat, O. et F. Doblas-Reyes (2016), « Attribution of extreme weather and climate events overestimated by unreliable climate simulations », *Geophysical Research Letters*, vol. 43/5, pp. 2158-2164, <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl067189>. [132]
- Bhat, G. (2006), « The Indian drought of 2002 – a sub-seasonal phenomenon? », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 132/621, pp. 2583-2602, <http://dx.doi.org/10.1256/qj.05.13>. [267]
- Bisaro, A. et al. (2019), « Leveraging public adaptation finance through urban land reclamation: Cases from Germany, the Netherlands and the Maldives », *Climatic Change*, vol. 160/4, pp. 671-689, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-019-02507-5>. [92]
- Boers, N. (2021), « Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation », *Nature Climate Change*, vol. 11/8, pp. 680-688, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>. [244]
- Buizert, C. et A. Schmittner (2015), « Southern Ocean control of glacial AMOC stability and Dansgaard-Oeschger interstadial duration », *Paleoceanography*, vol. 30/12, pp. 1595-1612, <http://dx.doi.org/10.1002/2015pa002795>. [236]
- Burke, M., S. Hsiang et E. Miguel (2015), « Global non-linear effect of temperature on economic production », *Nature*, vol. 527/7577, pp. 235-239, <http://dx.doi.org/10.1038/nature15725>. [258]
- Byrne, M. et P. O’Gorman (2018), « Trends in continental temperature and humidity directly linked to ocean warming », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115/19, pp. 4863-4868, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1722312115>. [149]

- Byrne, M. et P. O’Gorman (2013), « Link between land-ocean warming contrast and surface relative humidities in simulations with coupled climate models », *Geophysical Research Letters*, vol. 40/19, pp. 5223-5227, <http://dx.doi.org/10.1002/grl.50971>. [148]
- Caesar, L. et al. (2021), « Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium », *Nature Geoscience*, vol. 14/3, pp. 118-120, <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>. [240]
- Caesar, L. et al. (2018), « Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation », *Nature*, vol. 556/7700, pp. 191-196, <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>. [239]
- Cai, Y., T. Lenton et T. Lontzek (2016), « Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO2 emission reduction », *Nature Climate Change*, vol. 6/5, pp. 520-525, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2964>. [68]
- Caloiero, T. (2014), « Analysis of rainfall trend in New Zealand », *Environmental Earth Sciences*, vol. 73/10, pp. 6297-6310, <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-3852-y>. [182]
- Carleton, T. et S. Hsiang (2016), « Social and economic impacts of climate », *Science*, vol. 353/6304, pp. aad9837-aad9837, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aad9837>. [252]
- Cattiaux, J. et A. Ribes (2018), « Defining Single Extreme Weather Events in a Climate Perspective », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 99/8, pp. 1557-1568, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-17-0281.1>. [180]
- CCNUCC (2010), *Décision 1/CP.16 : Les accords de Cancún : Résultats des travaux du Groupe de travail spécial de l’action concertée à long terme au titre de la Convention*, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Genève. [8]
- CCNUCC (1992), *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, Bonn. [85]
- CDB (1992), *Convention sur la diversité biologique*, (1760 U.N.T.S. p. 79). [37]
- CDP (2020), « 2019-2020 Australian Bushfires », 9 septembre, Center for Disaster Philanthropy, Washington, D.C., <https://disasterphilanthropy.org/disaster/2019-australian-wildfires/> (consulté le 21 septembre 2021). [19]
- Challinor, A. et al. (2018), « Transmission of climate risks across sectors and borders », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 376/2121, p. 20170301, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0301>. [73]
- Charlier, R., M. Chaineux et S. Morcos (2005), « Panorama of the history of coastal protection », *Journal of Coastal Research*, vol. 211, pp. 79-111, <http://dx.doi.org/10.2112/03561.1>. [96]
- Chatterton, J. et al. (2016), *The Costs and Impacts of the Winter 2013 to 2014 Floods*, Environment Agency, Bristol, Royaume-Uni, https://assets.publishing.service.gov.uk/media/603549118fa8f5480a5386be/The_costs_and_impacts_of_the_winter_2013_to_2014_floods_-_report.pdf. [208]
- Cheng, W. et al. (2018), « Can the salt-advection feedback be detected in internal variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation? », *Journal of Climate*, vol. 31/16, pp. 6649-6667, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-17-0825.1>. [233]

- Ciavarella, A. et al. (2021), « Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence », *Climatic Change*, vol. 166/1-2, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>. [283]
- Ciemer, C. et al. (2021), « Impact of an AMOC weakening on the stability of the southern Amazon rainforest », *The European Physical Journal Special Topics*, <http://dx.doi.org/10.1140/epjs/s11734-021-00186-x>. [265]
- Clarke, B., F. E. L. Otto et R. Jones (2021), « Inventories of extreme weather events and impacts: Implications for loss and damage from and adaptation to climate extremes », *Climate Risk Management*, vol. 32, p. 100285, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2021.100285>. [139]
- Consortium du réseau international d'information sur les sciences de la Terre - CIESIN (2005), *Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Count Grid, Future Estimates*. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC)., Columbia University, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture - FAO et Centre international d'agriculture tropicale - CIAT, <https://doi.org/10.7927/H42B8VZZ> (consulté le 8 octobre 2021). [200]
- Cowan, T. et al. (2014), « More frequent, longer, and hotter heat waves for Australia in the twenty-first century », *Journal of Climate*, vol. 27/15, pp. 5851-5871, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-14-00092.1>. [189]
- Cox, P. et al. (2004), « Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century », *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 78/1-3, <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-004-0049-4>. [255]
- CR2 (2015), *Report to the Nation. The 2010-2015 mega-drought: A lesson for the future.*, Center for Climate and Resilience Research, <https://www.cr2.cl/megasequia/#1513260570409-9738626d-983a>. [173]
- Di Liberto, T. (2021), « Astounding heat obliterates all-time records across the Pacific Northwest and Western Canada in June 2021 », 30 juin, Climate.gov, <https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/astounding-heat-obliterates-all-time-records-across-pacific-northwest> (consulté le 10 Sep 2021). [27]
- Diffenbaugh, N., D. Swain et D. Touma (2015), « Anthropogenic warming has increased drought risk in California », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112/13, pp. 3931-3936, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1422385112>. [172]
- Douville, H. et al. (2021), « Water cycle changes », dans Masson-Delmotte, V. et al. (dir. pub.), *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to 45 the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. [245]
- Drijfhout, S. (2015), « Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance », *Scientific Reports*, vol. 5/1, <http://dx.doi.org/10.1038/srep14877>. [65]
- Drijfhout, S. et al. (2015), « Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112/43, pp. E5777-E5786, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1511451112>. [225]

- Dunn, F. et al. (2019), « Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress », *Environmental Research Letters*, vol. 14/8, p. 084034, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab304e>. [118]
- Duvat, V. (2018), « A global assessment of atoll island planform changes over the past decades », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, vol. 10/1, p. e557, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.557>. [104]
- Edmonds, C. et I. Noy (2018), « The economics of disaster risks and impacts in the Pacific », *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, vol. 27/5, pp. 478-494, <http://dx.doi.org/10.1108/dpm-02-2018-0057>. [91]
- Einhorn, C. (2021), « Like in 'postapocalyptic movies': Heat wave killed marine wildlife en masse », 9 juillet, The New York Times, <https://www.nytimes.com/2021/07/09/climate/marine-heat-wave.html>. [31]
- Falkland, T. et I. White (2020), « Freshwater availability under climate change », dans *Springer Climate, Climate Change and Impacts in the Pacific*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-32878-8_11. [119]
- FAOSTAT (2021), « Bilans Alimentaires », <https://www.fao.org/faostat/fr/#data/FBS> (consulté le 13 octobre 2021). [253]
- Ferrario, F. et al. (2014), « The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation », *Nature Communications*, vol. 5/1, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4794>. [109]
- Fischer, E. et R. Knutti (2015), « Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes », *Nature Climate Change*, vol. 5/6, pp. 560-564, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2617>. [142]
- Forum économique mondial (2018), *The Global Risks Report 2018*, Forum économique mondial, Genève. [76]
- Fowler, H. et al. (2021), « Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes », *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 2/2, pp. 107-122, <http://dx.doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>. [162]
- Fox-Kemper, B. et al. (2021), « Ocean, cryosphere and sea level change », dans *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. [40]
- Frame, D. et al. (2017), « Population-based emergence of unfamiliar climates », *Nature Climate Change*, vol. 7/6, pp. 407-411, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3297>. [194]
- Frame, D. et al. (2020), « Climate change attribution and the economic costs of extreme weather events: A study on damages from extreme rainfall and drought », *Climatic Change*, vol. 162/2, pp. 781-797, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-020-02729-y>. [138]
- Freychet, N. et al. (2019), « The Local Aerosol Emission Effect on Surface Shortwave Radiation and Temperatures », *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 11/3, pp. 806-817, <http://dx.doi.org/10.1029/2018ms001530>. [166]

- Frölicher, T., E. Fischer et N. Gruber (2018), « Marine heatwaves under global warming », *Nature*, vol. 560/7718, pp. 360-364, <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>. [144]
- Frost, R. (2021), « Turkey, Greece and Italy: Which countries are being affected by wildfires and why? », 13 août, euronews.travel, <https://www.euronews.com/travel/2021/08/12/european-heatwave-which-countries-face-the-biggest-risk-from-wildfires>. [20]
- Frost, R. (2021), « Wildfire near French resort of Saint-Tropez kills two people », 12 août, euronews.travel, <https://www.euronews.com/travel/2021/08/12/european-heatwave-which-countries-face-the-biggest-risk-from-wildfires>. [22]
- Gadgil, S. et S. Gadgil (2006), « The Indian monsoon, GDP and agriculture », *Economic and Political Weekly*, vol. 41/47, pp. 4887-4895, <http://www.jstor.org/stable/4418949>. [250]
- GIEC (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. et al. (dir. pub.), Cambridge University Press, Royaume-Uni, sous presse. [14]
- GIEC (2019), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [35]
- GIEC (2019), *Rapport spécial sur le changement climatique et terres émergées*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [34]
- GIEC (2019), « Summary for Policymakers », dans H.-O. Pörtner et al. (dir. pub.), *Rapport spécial du GIEC sur les océans et la cryosphère dans le contexte du changement climatique*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [11]
- GIEC (2018), « Annexe I : Glossaire [Matthews, J.B.R. (dir. pub.)] », dans Masson-Delmotte, V. et al. (dir. pub.), *Réchauffement planétaire de 1,5°C - Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique...*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [5]
- GIEC (2018), « Résumé à l'intention des décideurs », dans Masson-Delmotte, V. et al. (dir. pub.), *Réchauffement planétaire de 1,5 °C : Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [10]
- GIEC (2014), *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse Contribution des Groupes de travail, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, R.K. Pachauri; L.A. Meyer (dir. pub.), Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève. [2]
- GIEC (2014), « Résumé à l'intention des décideurs », dans Field, C. et al. (dir. pub.), *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Royaume-Uni et New York. [1]

- GIEC (2001), *Bilan 2001 des changements climatiques : Rapport de synthèse Contribution des groupes de travail I, II et III au Troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques*, Watson, R.T. et al. (dir. pub.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York. [9]
- Gingerich, S., C. Voss et A. Johnson (2017), « Seawater-flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation », *Journal of Hydrology*, vol. 551, pp. 676-688, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.001>. [120]
- Gladwell, M. (2000), *The Tipping Point: How Little Things Can Make a Big Difference*, Little Brown, Boston. [59]
- Gomes Da Costa, H. et al. (2020), « European wildfire danger and vulnerability under a changing climate: Towards integrating risk dimensions », n° EUR 30116 EN, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, <http://dx.doi.org/doi:10.2760/46951>. [17]
- González, M. et al. (2020), *Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia*, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile. [18]
- Guha-Sapir, D., D. Hargitt et P. Hoyois (2004), *Thirty Years of Natural Disasters 1974-2003: The Numbers*, Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes, Bruxelles. [174]
- Guillod, B. et al. (2017), « A large set of potential past, present and future hydro-meteorological time series for the UK », *Hydrology and Earth Systems Sciences*, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-2017-246>. [183]
- Hallegatte, S. et al. (2013), « Future flood losses in major coastal cities », *Nature Climate Change*, vol. 3/9, pp. 802-806, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1979>. [99]
- Harrington, L. et al. (2016), « Poorest countries experience earlier anthropogenic emergence of daily temperature extremes », *Environmental Research Letters*, vol. 11/5, p. 055007, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/055007>. [198]
- Harrington, L. et al. (2018), « How uneven are changes to impact-relevant climate hazards in a 1.5 °C world and beyond? », *Geophysical Research Letters*, vol. 45/13, pp. 6672-6680, <http://dx.doi.org/10.1029/2018gl078888>. [187]
- Harrington, L. et F. Otto (2020), « Reconciling theory with the reality of African heatwaves », *Nature Climate Change*, vol. 10/9, pp. 796-798, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-0851-8>. [221]
- Hawkins, E. et al. (2020), « Observed emergence of the climate change signal: From the familiar to the unknown », *Geophysical Research Letters*, vol. 47/6, <http://dx.doi.org/10.1029/2019gl086259>. [195]
- Hawkins, E. et al. (2011), « Bistability of the Atlantic overturning circulation in a global climate model and links to ocean freshwater transport », *Geophysical Research Letters*, vol. 38/10, <http://dx.doi.org/10.1029/2011gl047208>. [231]
- Hawkins, E. et R. Sutton (2012), « Time of emergence of climate signals », *Geophysical Research Letters*, vol. 39/1, <http://dx.doi.org/10.1029/2011gl050087>. [193]

- Hegdahl, T. et al. (2020), « An Event-Based Approach to Explore Selected Present and Future Atmospheric River–Induced Floods in Western Norway », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 21/9, pp. 2003-2021, <http://dx.doi.org/10.1175/jhm-d-19-0071.1>. [137]
- Hewitt, H. et al. (2011), « Design and implementation of the infrastructure of HadGEM3: the next-generation Met Office climate modelling system », *Geoscientific Model Development*, vol. 4/2, pp. 223-253, <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-4-223-2011>. [276]
- Hildén, M. et al. (2020), « Cascading climate impacts: A new factor in European policy-making », *Policy Brief*, CASCADES, <https://www.sei.org/wp-content/uploads/2020/03/cascades-policy-brief-1-1.pdf>. [74]
- Hinkel, J. et al. (2018), « The ability of societies to adapt to twenty-first-century sea-level rise », *Nature Climate Change*, vol. 8/7, pp. 570-578, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0176-z>. [100]
- Hinkel, J. et al. (2019), « Meeting user needs for sea level rise information: A decision analysis perspective », *Earth's Future*, vol. 7/3, pp. 320-337, <http://dx.doi.org/10.1029/2018ef001071>. [44]
- Hinkel, J. et al. (2014), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 111/9, pp. 3292-3297, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1222469111>. [95]
- Hirabayashi, Y. et al. (2013), *Global flood risk under climate change*, Nature Publishing Group, <https://www.nature.com/articles/nclimate1911>. [33]
- Hodges, K., A. Cobb et P. Vidale (2017), « How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets? », *Journal of Climate*, vol. 30/14, pp. 5243-5264, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-16-0557.1>. [55]
- Hodnebrog, Ø. et al. (2019), « Intensification of summer precipitation with shorter time-scales in Europe », *Environmental Research Letters*, vol. 14/12, p. 124050, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab549c>. [164]
- Holdaway, A., M. Ford et S. Owen (2021), « Global-scale changes in the area of atoll islands during the 21st century », *Anthropocene*, vol. 33, p. 100282, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100282>. [105]
- Holding, S. et D. Allen (2015), « From days to decades: Numerical modelling of freshwater lens response to climate change stressors on small low-lying islands », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19/2, pp. 933-949, <http://dx.doi.org/10.5194/hess-19-933-2015>. [121]
- Holliday, N. et al. (2020), « Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic », *Nature Communications*, vol. 11/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-14474-y>. [237]
- Hughes, T. et al. (2018), « Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene », *Science*, vol. 359/6371, pp. 80-83, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aan8048>. [112]
- Hughes, T. et al. (2017), « Global warming and recurrent mass bleaching of corals », *Nature*, vol. 543/7645, pp. 373-377, <http://dx.doi.org/10.1038/nature21707>. [111]

- Jackson, L. et al. (2015), « Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM », *Climate Dynamics*, vol. 45/11-12, pp. 3299-3316, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>. [248]
- Jacob, D. et al. (2005), « Slowdown of the thermohaline circulation causes enhanced maritime climate influence and snow cover over Europe », *Geophysical Research Letters*, vol. 32/21, <http://dx.doi.org/10.1029/2005gl023286>. [282]
- Jolly, W. et al. (2015), « Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 », *Nature Communications*, vol. 6/1, pp. 1-11, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms8537>. [15]
- Jongman, B. et al. (2015), « Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112/18, pp. E2271-E2280, <https://www.pnas.org/content/112/18/E2271.short>. [210]
- Joshi, M. et al. (2007), « Mechanisms for the land/sea warming contrast exhibited by simulations of climate change », *Climate Dynamics*, vol. 30/5, pp. 455-465, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-007-0306-1>. [147]
- Keeley, J. et A. Syphard (2021), « Large California wildfires: 2020 fires in historical context », *Fire Ecology*, vol. 17/1, <http://dx.doi.org/10.1186/s42408-021-00110-7>. [24]
- Keen, S. et al. (2021), « Economists' erroneous estimates of damages from climate change », *arXiv*, vol. 2108.07847v1, <https://arxiv.org/abs/2108.07847v1>. [259]
- Kench, P. (2012), « Compromising reef island shoreline dynamics: Legacies of the engineering paradigm in the Maldives », dans *Pitfalls of Shoreline Stabilization, Coastal Research Library*, Springer Netherlands, Dordrecht, http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-4123-2_11. [106]
- Kew, S. et al. (2021), « Impact of precipitation and increasing temperatures on drought trends in eastern Africa », *Earth System Dynamics*, vol. 12/1, pp. 17-35, <http://dx.doi.org/10.5194/esd-12-17-2021>. [169]
- Kharin, V. et al. (2018), « Risks from Climate Extremes Change Differently from 1.5°C to 2.0°C Depending on Rarity », *Earth's Future*, vol. 6/5, pp. 704-715, <http://dx.doi.org/10.1002/2018ef000813>. [165]
- King, A. et al. (2016), « Emergence of heat extremes attributable to anthropogenic influences », *Geophysical Research Letters*, vol. 43/7, pp. 3438-3443, <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl067448>. [186]
- King, A. et al. (2015), « The timing of anthropogenic emergence in simulated climate extremes », *Environmental Research Letters*, vol. 10/9, p. 094015, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094015>. [185]
- King, A. et L. Harrington (2018), « The inequality of climate change from 1.5 to 2°C of global warming », *Geophysical Research Letters*, vol. 45/10, pp. 5030-5033, <http://dx.doi.org/10.1029/2018gl078430>. [199]
- Kinzig, A. et al. (2006), « Resilience and regime shifts: Assessing cascading effects », *Ecology and Society*, vol. 11/1. [75]

- Klöck, C. et P. Nunn (2019), « Adaptation to climate change in Small Island Developing States: A systematic literature review of academic research », *The Journal of Environment & Development*, vol. 28/2, pp. 196-218, <http://dx.doi.org/10.1177/1070496519835895>. [97]
- Koks, E. (2018), « Moving flood risk modelling forwards », *Nature Climate Change*, vol. 8/7, pp. 561-562, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0185-y>. [72]
- Koven, C. (2013), « Boreal carbon loss due to poleward shift in low-carbon ecosystems », *Nature Geoscience*, vol. 6/6, pp. 452-456, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1801>. [266]
- Kreibich, H. et al. (2017), « Adaptation to flood risk: Results of international paired flood event studies », *Earth's Future*, vol. 5/10, pp. 953-965, <http://dx.doi.org/10.1002/2017ef000606>. [211]
- Kriegler, E. et al. (2009), « Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106/13, pp. 5041-5046, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0809117106>. [66]
- Kroeker, K. et al. (2013), « Impacts of ocean acidification on marine organisms: Quantifying sensitivities and interaction with warming », *Global Change Biology*, vol. 19/6, pp. 1884-1896, <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12179>. [114]
- Kron, W. (2012), « Coasts: The high-risk areas of the world », *Natural Hazards*, vol. 66/3, pp. 1363-1382, <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0215-4>. [89]
- Kumar, L. et al. (2018), « An indicative index of physical susceptibility of small islands to coastal erosion induced by climate change: An application to the Pacific islands », *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 9/1, pp. 691-702, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2018.1455749>. [107]
- Lawrence, J., P. Blackett et N. Cradock-Henry (2020), « Cascading climate change impacts and implications », *Climate Risk Management*, vol. 29, p. 100234, <http://dx.doi.org/10.1016/j.crm.2020.100234>. [78]
- Leach, N. et al. (2020), « Anthropogenic Influence on the 2018 Summer Warm Spell in Europe: The Impact of Different Spatio-Temporal Scales », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101/1, pp. S41-S46, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-19-0201.1>. [181]
- Leatherman, S. et N. Beller-Simms (1997), « Sea-level rise and Small Island States: An overview », *Journal of Coastal Research*, <http://www.jstor.org/stable/25736084> (consulté le 8 juillet 2021). [86]
- Lenton, T. (2011), « Early warning of climate tipping points », *Nature Climate Change*, vol. 1/4, pp. 201-209, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1143>. [63]
- Lenton, T. et J. Ciscar (2012), « Integrating tipping points into climate impact assessments », *Climatic Change*, vol. 117/3, pp. 585-597, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-012-0572-8>. [70]
- Lenton, T. et al. (2008), « Tipping elements in the Earth's climate system », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105/6, pp. 1786-1793, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0705414105>. [4]
- Lenton, T. et al. (2019), « Climate tipping points — too risky to bet against », *Nature*, vol. 575/7784, pp. 592-595, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-019-03595-0>. [64]

- Lenton, T. et H. Williams (2013), « On the origin of planetary-scale tipping points », *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 28/7, pp. 380-382, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2013.06.001>. [62]
- Levermann, A. et al. (2011), « Potential climatic transitions with profound impact on Europe », *Climatic Change*, vol. 110/3-4, pp. 845-878, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-011-0126-5>. [60]
- Levermann, A. et al. (2005), « Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation », *Climate Dynamics*, vol. 24/4, pp. 347-354, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-004-0505-y>. [272]
- Levermann, A. et al. (2009), « Basic mechanism for abrupt monsoon transitions », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106/49, pp. 20572-20577, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0901414106>. [256]
- Liepert, B. et A. Giannini (2015), « Global warming, the atmospheric brown cloud, and the changing Indian summer monsoon », *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 71/4, pp. 23-30, <http://dx.doi.org/10.1177/0096340215590802>. [271]
- Lincke, D. et J. Hinkel (2018), « Economically robust protection against 21st century sea-level rise », *Global Environmental Change*, vol. 51, pp. 67-73, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.003>. [93]
- Link, P. et R. Tol (2010), « Estimation of the economic impact of temperature changes induced by a shutdown of the thermohaline circulation: An application of FUND », *Climatic Change*, vol. 104/2, pp. 287-304, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-009-9796-7>. [261]
- Li, R. et al. (2021), « Anthropogenic Influences on heavy precipitation during the 2019 extremely wet rainy season in Southern China », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 102/1, pp. S103-S109, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-20-0135.1>. [206]
- Liu, W. et al. (2017), « Overlooked possibility of a collapsed Atlantic Meridional Overturning Circulation in warming climate », *Science Advances*, vol. 3/1, p. e1601666, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1601666>. [246]
- Lloyd, E. et N. Oreskes (2018), « Climate change attribution: When is it appropriate to accept new methods? », *Earth's Future*, vol. 6/3, pp. 311-325, <http://dx.doi.org/10.1002/2017ef000665>. [140]
- Lloyd, E. et al. (2021), « Climate scientists set the bar of proof too high », *Climatic Change*, vol. 165/3-4, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-021-03061-9>. [141]
- Lontzek, T. et al. (2015), « Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy », *Nature Climate Change*, vol. 5/5, pp. 441-444, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2570>. [222]
- Lovelock, C. et al. (2015), « The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise », *Nature*, vol. 526/7574, pp. 559-563, <http://dx.doi.org/10.1038/nature15538>. [115]
- Lowe, J. et al. (2009), « Marine and coastal projections », dans *UK Climate Projections Science Report*, Met Office Hadley Centre, Exeter, Royaume-Uni. [41]
- Luijendijk, A. et al. (2018), « The state of the world's beaches », *Scientific Reports*, vol. 8/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>. [101]

- Mahlstein, I. et al. (2011), « Early onset of significant local warming in low latitude countries », *Environmental Research Letters*, vol. 6/3, p. 034009, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/034009>. [197]
- Maraun, D. et al. (2017), « Towards process-informed bias correction of climate change simulations », *Nature Climate Change*, vol. 7/11, pp. 764-773, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3418>. [217]
- Marotzke, J. et al. (2017), « Climate research must sharpen its view », *Nature Climate Change*, vol. 7/2, pp. 89-91, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3206>. [219]
- Matthews, T. (2018), « Humid heat and climate change », *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 42/3, pp. 391-405, <http://dx.doi.org/10.1177/0309133318776490>. [201]
- McLean, R. et P. Kench (2015), « Destruction or persistence of coral atoll islands in the face of 20th and 21st century sea-level rise? », *WIREs Climate Change*, vol. 6/5, pp. 445-463, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.350>. [108]
- Mecking, J. et al. (2016), « Stable AMOC off state in an eddy-permitting coupled climate model », *Climate Dynamics*, vol. 47/7-8, pp. 2455-2470, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-016-2975-0>. [249]
- Menéndez, M. et P. Woodworth (2010), « Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 115/C10, <http://dx.doi.org/10.1029/2009jc005997>. [48]
- Mentaschi, L. (2018), *The Effect of Changing Spatial Resolution in Global Dynamic Wave Models*, Wiley, Hoboken, États-Unis, <http://dx.doi.org/10.1002/essoar.10500014.1>. [57]
- Mentaschi, L. et al. (2020), « Assessment of global wave models on regular and unstructured grids using the Unresolved Obstacles Source Term », *Ocean Dynamics*, vol. 70/11, pp. 1475-1483, <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-020-01410-3>. [56]
- Meredith, E. et al. (2015), « Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120/24, pp. 12500-12513, <http://dx.doi.org/10.1002/2015jd024238>. [158]
- Meredith, E. et al. (2015), « Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme », *Nature Geoscience*, vol. 8/8, pp. 615-619, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2483>. [159]
- Mezahi, M. (2021), « Algeria's desperate wildfire fight: Buckets and branches », 22 août, BBC, <https://www.bbc.com/news/world-africa-58269789>. [21]
- Moffa-Sánchez, P. et al. (2014), « Surface changes in the eastern Labrador Sea around the onset of the Little Ice Age », *Paleoceanography*, vol. 29/3, pp. 160-175, <http://dx.doi.org/10.1002/2013pa002523>. [230]
- Mora, C. et al. (2017), « Global risk of deadly heat », *Nature Climate Change*, vol. 7/7, pp. 501-506, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3322>. [196]
- Moreno-Chamarro, E. et al. (2016), « An abrupt weakening of the subpolar gyre as trigger of Little Ice Age-type episodes », *Climate Dynamics*, vol. 48/3-4, pp. 727-744, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-016-3106-7>. [228]

- Muis, S. et al. (2020), « A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections », *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>. [51]
- Muis, S. et al. (2016), « A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels », *Nature Communications*, vol. 7/1, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms11969>. [52]
- Nicholls, R. et al. (2013), « Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts », *WIREs Climate Change*, vol. 5/1, pp. 129-150, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.253>. [42]
- NOAA National Centers for Environmental Information (NCEI) (2021), « .S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters ». [126]
- Noy, I. (2016), « The socio-economics of cyclones », *Nature Climate Change*, vol. 6/4, pp. 343-345, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2975>. [176]
- Noy, I. et W. duPont IV (2018), « The long-term consequences of disasters: What do we know, and what we still don't », *International Review of Environmental and Resource Economics*, vol. 12/4, pp. 325-354, <http://dx.doi.org/10.1561/101.00000104>. [177]
- Nunn, P. et al. (2016), « Classifying Pacific islands », *Geoscience Letters*, vol. 3/1, <http://dx.doi.org/10.1186/s40562-016-0041-8>. [82]
- Nurse, L. et al. (2014), *Small isla*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York. [50]
- OCDE (2018), *Making Development Co-operation Work for Small Island Developing States*, Éditions OCDE, Paris, <https://dx.doi.org/10.1787/9789264287648-en>. [83]
- OHRLLS (2021), *Country Profiles*, Nations Unies, le Bureau de la Haute Représentante pour les pays les moins avancés, les pays en développement sans littoral et les petits États insulaires en développement, New York, <http://unohrlls.org/about-sids/country-profiles/> (consulté le 8 juillet 2021). [79]
- OHRLLS (2015), *Small Island Developing States in Numbers: Climate Change*, Les Nations Unies, Bureau de la Haute Représentante pour les pays les moins avancés, les pays en développement sans littoral et les petits États insulaires en développement, New York. [81]
- Oliver, E. et al. (2017), « The unprecedented 2015/16 Tasman Sea marine heatwave », *Nature Communications*, vol. 8/1, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms16101>. [143]
- Oppenheimer, M. et al. (2021), « Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities », dans H.-O. Pörtner et al. (dir. pub.), *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni. [49]
- Oppenheimer, M. et al. (2019), *Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities*, Oxford University Press. [39]
- Otto, F. (2017), « Attribution of weather and climate events », *Annual Review of Environment and Resources*, vol. 42/1, pp. 627-646, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060847>. [128]

- Otto, F. et al. (2015), « Attribution of extreme weather events in Africa: A preliminary exploration of the science and policy implications », *Climatic Change*, vol. 132/4, pp. 531-543, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1432-0>. [215]
- Otto, F. et al. (2020), « Toward an inventory of the impacts of human-induced climate change », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101/11, pp. E1972-E1979, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-20-0027.1>. [133]
- Otto, F. et al. (2020), « Challenges to understanding extreme weather changes in lower income countries », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 101/10, pp. E1851-E1860, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-19-0317.1>. [220]
- Otto, F. et al. (2015), « Factors Other Than Climate Change, Main Drivers of 2014/15 Water Shortage in Southeast Brazil », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96/12, pp. S35-S40, <http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-15-00120.1>. [170]
- Otto, F. et al. (2012), « Reconciling two approaches to attribution of the 2010 Russian heat wave », *Geophysical Research Letters*, vol. 39/4, pp. n/a-n/a, <http://dx.doi.org/10.1029/2011gl050422>. [130]
- Otto, F. et al. (2018), « Climate change increases the probability of heavy rains in Northern England/Southern Scotland like those of storm Desmond—a real-time event attribution revisited », *Environmental Research Letters*, vol. 13/2, p. 024006, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa9663>. [145]
- Otto, F. et al. (2018), « Anthropogenic influence on the drivers of the Western Cape drought 2015–2017 », *Environmental Research Letters*, vol. 13/12, p. 124010, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aae9f9>. [171]
- Pall, P. et al. (2011), « Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000 », *Nature*, vol. 470/7334, pp. 382-385, <http://dx.doi.org/10.1038/nature09762>. [209]
- Pecl, G. et al. (2017), « Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being », *Science*, vol. 355/6332, p. eaai9214, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aai9214>. [38]
- Pendergrass, A. (2018), « What precipitation is extreme? », *Science*, vol. 360/6393, pp. 1072-1073, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aat1871>. [157]
- Perkins-Kirkpatrick, S. et P. Gibson (2017), « Changes in regional heatwave characteristics as a function of increasing global temperature », *Scientific Reports*, vol. 7/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-12520-2>. [146]
- Perkins, S. et L. Alexander (2013), « On the measurement of heat waves », *Journal of Climate*, vol. 26/13, pp. 4500-4517, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00383.1>. [188]
- Philip, S. et al. (2018), « Attribution Analysis of the Ethiopian Drought of 2015 », *Journal of Climate*, vol. 31/6, pp. 2465-2486, <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-17-0274.1>. [168]
- Philip, S. et al. (2021), « Rapid attribution analysis of the extraordinary heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021 », World Weather Attribution, <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/NW-US-extreme-heat-2021-scientific-report-WWA.pdf>. [26]

- Philip, S. et al. (2020), « A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses », [134]
Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography, vol. 6/2, pp. 177-203,
<http://dx.doi.org/10.5194/ascmo-6-177-2020>.
- Piecuch, C. (2020), « Weakening of the Gulf Stream at Florida Straits over the past century [243]
 inferred from coastal sea-level data », *Earth and Space Science Open7Archive*,
<http://dx.doi.org/10.1002/essoar.10502506.1>.
- PNUE (2014), *GEO l'avenir de l'environnement dans les petits États insulaires en* [90]
développement, Programme des Nations Unies pour l'environnement, Nairobi.
- Popovich, N. et W. Choi-Schagrin (2021), « Hidden toll of the northwest heat wave: Hundreds of [29]
 extra deaths », 11 août, The New York Times,
<https://www.nytimes.com/interactive/2021/08/11/climate/deaths-pacific-northwest-heat-wave.html>.
- Praetorius, S. (2018), « North Atlantic circulation slows down », *Nature*, vol. 556/7700, pp. 180- [232]
 181, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-018-04086-4>.
- Prein, A. et al. (2015), « A review on regional convection-permitting climate modeling: [160]
 Demonstrations, prospects, and challenges », *Reviews of Geophysics*, vol. 53/2, pp. 323-361,
<http://dx.doi.org/10.1002/2014rg000475>.
- Prein, A. et al. (2016), « The future intensification of hourly precipitation extremes », *Nature* [161]
Climate Change, vol. 7/1, pp. 48-52, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3168>.
- Quigley, M. et al. (2020), « A multi-hazards earth science perspective on the COVID-19 [204]
 pandemic: The potential for concurrent and cascading crises », *Environment Systems and*
Decisions, vol. 40/2, pp. 199-215, <http://dx.doi.org/10.1007/s10669-020-09772-1>.
- Rahmstorf, S. et al. (2015), « Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean [238]
 overturning circulation », *Nature Climate Change*, vol. 5/5, pp. 475-480,
<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2554>.
- Railsback, L. (2017), « Rain, riches, and empire: The relationship between nations ruling distant [263]
 lands, nations of great wealth, and regions of regular moderate atmospheric precipitation », *Weather, Climate, and Society*, vol. 9/3, pp. 455-469, <http://dx.doi.org/10.1175/wcas-d-16-0143.1>.
- Ramanathan, V. et al. (2005), « Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and [269]
 hydrological cycle », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 102/15,
 pp. 5326-5333, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0500656102>.
- Ranasinghe, R. (2016), « Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review », [102]
Earth-Science Reviews, vol. 160, pp. 320-332,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>.
- Ratter, B. (2018), *Geography of Small Islands*, Springer International Publishing, Cham, [80]
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-63869-0>.
- Reuters (2021), « California's giant sequoias remain safe from growing wildfire », 20 septembre, [23]
 Reuters, <https://www.reuters.com/business/environment/californias-giant-sequoias-remain-safe-growing-wildfire-2021-09-20/>.

- Riahi, K. et al. (2017), « The Shared Socio-economic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview », *Global Environmental Change*, vol. 42, pp. 153-168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>. [278]
- Ritchie, H. et M. Roser (2014), « Natural disasters », *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/natural-disasters>. [213]
- Ritchie, P. et al. (2021), « Overshooting tipping point thresholds in a changing climate », *Nature*, vol. 592/7855, pp. 517-523, <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03263-2>. [67]
- Robinson, S. (2020), « Climate change adaptation in SIDS : A systematic review of the literature pre and post the IPCC Fifth Assessment Report », *WIREs Climate Change*, vol. 11/4, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.653>. [87]
- Rodgers, K. et al. (2021), « Ubiquity of human-induced changes in climate variability », *Earth System Dynamics Discussion [en prépublication]*, <http://dx.doi.org/10.5194/esd-2021-50>. [264]
- Rossignol-Strick, M. (1985), « Mediterranean Quaternary sapropels, an immediate response of the African monsoon to variation of insolation », *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 49/3-4, pp. 237-263, [http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182\(85\)90056-2](http://dx.doi.org/10.1016/0031-0182(85)90056-2). [257]
- Ross, L. (6 août 2020), « Climate change and wildfires: Projecting future wildfire potential », Four Twenty Seven blog, <http://427mt.com/2020/08/06/projecting-future-wildfire-potential/>. [16]
- Russo, S. et al. (2016), « When will unusual heat waves become normal in a warming Africa? », *Environmental Research Letters*, vol. 11/5, p. 054016, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054016>. [191]
- Russo, S., J. Sillmann et E. Fischer (2015), « Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades », *Environmental Research Letters*, vol. 10/12, p. 124003, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>. [190]
- Sasmito, S. et al. (2015), « Can mangroves keep pace with contemporary sea level rise? A global data review », *Wetlands Ecology and Management*, vol. 24/2, pp. 263-278, <http://dx.doi.org/10.1007/s11273-015-9466-7>. [117]
- Schäfer, L. et al. (2021), *Slow-onset Processes and Resulting Loss and Damage – An introduction*, Germanwatch e.V, Bonn, Allemagne. [7]
- Schaller, N. et al. (2016), « Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts », *Nature Climate Change*, vol. 6/6, pp. 627-634, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2927>. [205]
- Scheffer, M. et al. (2012), « Anticipating critical transitions », *Science*, vol. 338/6105, pp. 344-348, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225244>. [61]
- Schiermeier, Q. (2021), « Climate change made North America's deadly heatwave 150 times more likely », *Nature*, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-021-01869-0>. [28]
- Schleussner, C. et G. Feulner (2013), « Was the Little Ice Age the result of a volcanically-triggered regime shift in the North Atlantic ocean circulation? », p. 6980. [229]

- Schleussner, C. et al. (2021), « Pathways of climate resilience over the 21st century », *Environmental Research Letters*, vol. 16/5, p. 054058, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abed79>. [212]
- Schramm, P. et al. (2021), « Heat-related emergency department visits during the northwestern heat wave – United States, June 2021 », *Morbidity and Mortality Weekly Report*, n° 70, 23 July, US Centers for Disease Control and Prevention, Washington D.C., <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/70/wr/pdfs/mm7029e1-H.pdf>. [30]
- Schuerch, M. et al. (2018), « Future response of global coastal wetlands to sea-level rise », *Nature*, vol. 561/7722, pp. 231-234, <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0476-5>. [116]
- Seneviratne, S. et al. (2016), « Allowable CO2 emissions based on regional and impact-related climate targets », *Nature*, vol. 529/7587, pp. 477-483, <http://dx.doi.org/10.1038/nature16542>. [150]
- Seneviratne, S. et M. Hauser (2020), « Regional Climate Sensitivity of Climate Extremes in CMIP6 Versus CMIP5 Multimodel Ensembles », *Earth's Future*, <p>e2019EF001474 2019EF001474</p>, p. e2019EF001474, <https://doi.org/10.1029/2019EF001474>. [154]
- Seneviratne, S. et al. (2012), « Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. », dans Field, C. et al. (dir. pub.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York. [6]
- Sgubin, G. et al. (2017), « Abrupt cooling over the North Atlantic in modern climate models », *Nature Communications*, vol. 8/1, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms14375>. [226]
- Shepherd, T. (2019), « Storyline approach to the construction of regional climate change information », *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 475/2225, p. 20190013, <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2019.0013>. [12]
- Shepherd, T. et al. (2018), « Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change », *Climatic Change*, vol. 151/3-4, pp. 555-571, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9>. [136]
- Shepherd, T. et A. Sobel (2020), « Localness in climate change », *Comparative Studies of South Asia, Africa and the Middle East*, vol. 40/1, pp. 7-16, <http://dx.doi.org/10.1215/1089201x-8185983>. [218]
- Sillmann, J. et al. (2013), « Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections », *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118/6, pp. 2473-2493, <http://dx.doi.org/10.1002/jgrd.50188>. [184]
- Smith, A. et R. Katz (2013), « US billion-dollar weather and climate disasters: Data sources, trends, accuracy and biases », *Natural Hazards*, vol. 67/2, pp. 387-410, <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-013-0566-5>. [124]
- Smith, A. et J. Matthews (2015), « Quantifying uncertainty and variable sensitivity within the US billion-dollar weather and climate disaster cost estimates », *Natural Hazards*, vol. 77/3, pp. 1829-1851, <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-015-1678-x>. [125]
- Spalding, M. et al. (2017), « Mapping the global value and distribution of coral reef tourism », *Marine Policy*, vol. 82, pp. 104-113, <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.014>. [110]

- Spinoni, J. et al. (2013), « World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010 », [281]
International Journal of Climatology, vol. 34/8, pp. 2792-2804,
<http://dx.doi.org/10.1002/joc.3875>.
- Stammer, D. et al. (2019), « Framework for High-End Estimates of Sea Level Rise for [45]
 Stakeholder Applications », *Earth's Future*, vol. 7/8, pp. 923-938,
<http://dx.doi.org/10.1029/2019ef001163>.
- Standard & Poor's Ratings Service (2015), *The Heat Is On: How Climate Change Can Impact [32]
 Sovereign Ratings*,
https://www.agefi.com/uploads/media/S_P_The_Heat_Is_On_How_Climate_Change_Can_Impact_Sovereign_Ratings_25-11-2015.pdf.
- Steffen, W. et al. (2018), « Trajectories of the Earth system in the Anthropocene », [224]
Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 115/33, pp. 8252-8259,
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.
- Stommel, H. (1961), « Thermohaline convection with two stable regimes of flow », [234]
Tellus, vol. 13/2, pp. 224-230, <http://dx.doi.org/10.1111/j.2153-3490.1961.tb00079.x>.
- Storlazzi, C. et al. (2018), « Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of [122]
 sea-level rise exacerbating wave-driven flooding », *Science Advances*, vol. 4/4, p. eaap9741,
<http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.aap9741>.
- Stott, P. et al. (2015), « Attribution of extreme weather and climate-related events », [127]
WIREs Climate Change, vol. 7/1, pp. 23-41, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.380>.
- Stott, P., D. Stone et M. Allen (2004), « Human contribution to the European heatwave of [131]
 2003 », *Nature*, vol. 432/7017, pp. 610-614, <http://dx.doi.org/10.1038/nature03089>.
- Sutton, R. (2019), « Climate science needs to take risk assessment much more seriously », [13]
Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 100/9, pp. 1637-1642,
<http://dx.doi.org/10.1175/bams-d-18-0280.1>.
- Swingedouw, D. et al. (2021), « On the risk of abrupt changes in the North Atlantic subpolar gyre [247]
 in CMIP6 models », *Annals of the New York Academy of Sciences*,
<http://dx.doi.org/10.1111/nyas.14659>.
- Swingedouw, D. et al. (2009), « Impact of freshwater release in the North Atlantic under different [280]
 climate conditions in an OAGCM », *Journal of Climate*, vol. 22/23, pp. 6377-6403,
<http://dx.doi.org/10.1175/2009jcli3028.1>.
- Swiss Re Institute (2021), *Natural catastrophes in 2020: secondary perils in the spotlight, but [279]
 don't forget primary-peril risks*, <https://www.swissre.com/institute/research/sigma-research/sigma-2021-01.html>.
- Tol, R. (2009), « The economic effects of climate change », [260]
Journal of Economic Perspectives, vol. 23/2, pp. 29-51, <http://dx.doi.org/10.1257/jep.23.2.29>.
- Tschumi, E. et J. Zscheischler (2019), « Countrywide climate features during recorded climate- [178]
 related disasters », *Climatic Change*, vol. 158/3-4, pp. 593-609,
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-019-02556-w>.

- Uhe, P. et al. (2017), « Attributing drivers of the 2016 Kenyan drought », *International Journal of Climatology*, vol. 38, pp. e554-e568, <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5389>. [167]
- UK Met Office (2014), « Winter storms, January to February 2014 », (fact sheet), UK Met Office, <https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/weather/learn-about/uk-past-events/interesting/2014/winter-storms-january-to-february-2014---met-office.pdf>. [207]
- UNDRR (2015), *Cadre de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe (2015-2030)*, Bureau des Nations Unies pour la prévention des catastrophes, Genève. [77]
- van der Geest, K. et R. van den Berg (2021), « Slow-onset events: A review of the evidence from the IPCC Special Reports on Land, Oceans and Cryosphere », *Current Opinion in Environmental Sustainability*, vol. 50, pp. 109-120, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2021.03.008>. [36]
- van Hooidonk, R. et al. (2016), « Local-scale projections of coral reef futures and implications of the Paris Agreement », *Scientific Reports*, vol. 6/1, <http://dx.doi.org/10.1038/srep39666>. [113]
- van Oldenborgh, G. et al. (2021), « Pathways and pitfalls in extreme event attribution », *Climatic Change*, vol. 166/1-2, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-021-03071-7>. [135]
- Vanos, J. et al. (2020), « Simplicity lacks robustness when projecting heat-health outcomes in a changing climate », *Nature Communications*, vol. 11/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-19994-1>. [202]
- Vautard, R. et al. (2020), « Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe », *Environmental Research Letters*, vol. 15/9, p. 094077, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aba3d4>. [153]
- Vautard, R. et al. (2016), « Attribution of human-induced dynamical and thermodynamical contributions in extreme weather events », *Environmental Research Letters*, vol. 11/11, p. 114009, <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114009>. [129]
- Vellinga, M. et R. Wood (2007), « Impacts of thermohaline circulation shutdown in the twenty-first century », *Climatic Change*, vol. 91/1-2, pp. 43-63, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9146-y>. [273]
- Vellinga, M. et R. Wood (2002), « Global climatic impacts of a collapse of the Atlantic Thermohaline Circulation », *Climatic Change*, vol. 54/3, pp. 251-267, <http://dx.doi.org/10.1023/a:1016168827653>. [277]
- Visser, H., A. Petersen et W. Ligtoet (2014), « On the relation between weather-related disaster impacts, vulnerability and climate change », *Climatic Change*, vol. 125/3-4, pp. 461-477, <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1179-z>. [175]
- Vogel, M. et al. (2017), « Regional amplification of projected changes in extreme temperatures strongly controlled by soil moisture-temperature feedbacks », *Geophysical Research Letters*, vol. 44/3, pp. 1511-1519, <http://dx.doi.org/10.1002/2016gl071235>. [151]
- Vogel, M., J. Zscheischler et S. Seneviratne (2018), « Varying soil moisture-atmosphere feedbacks explain divergent temperature extremes and precipitation projections in central Europe », *Earth System Dynamics*, vol. 9/3, pp. 1107-1125, <http://dx.doi.org/10.5194/esd-9-1107-2018>. [152]

- Vousdoukas, M. et al. (2020), « Economic motivation for raising coastal flood defenses in Europe », *Nature Communications*, vol. 11/1, <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-15665-3>. [274]
- Vousdoukas, M. et al. (2017), « Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts », *Earth's Future*, vol. 5/3, pp. 304-323, <http://dx.doi.org/10.1002/2016ef000505>. [53]
- Vousdoukas, M. et al. (2020), « Sandy coastlines under threat of erosion », *Nature Climate Change*, vol. 10/3, pp. 260-263, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>. [103]
- Wahl, T. et al. (2017), « Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis », *Nature Communications*, vol. 8/1, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms16075>. [46]
- Westra, S. et al. (2014), « Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall », *Reviews of Geophysics*, vol. 52/3, pp. 522-555, <http://dx.doi.org/10.1002/2014rg000464>. [163]
- Whitty, C. et F. Watt (2020), « Map clusters of diseases to tackle multimorbidity », *Nature*, vol. 579/7800, pp. 494-496, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-020-00837-4>. [203]
- Williams, K. et al. (2015), « The Met Office Global Coupled model 2.0 (GC2) configuration », *Geoscientific Model Development*, vol. 8/5, pp. 1509-1524, <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-8-1509-2015>. [275]
- Williamson, M. et al. (2017), « Effect of AMOC collapse on ENSO in a high resolution general circulation model », *Climate Dynamics*, vol. 50/7-8, pp. 2537-2552, <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-017-3756-0>. [254]
- Witze, A. (2018), « Why extreme rains are gaining strength as the climate warms », *Nature*, vol. 563/7732, pp. 458-460, <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-018-07447-1>. [25]
- Wong, P. et al. (2014), « Coastal systems and low-lying areas », dans Field, C. et al. (dir. pub.), *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York. [94]
- Woodroffe, C. (2008), « Reef-island topography and the vulnerability of atolls to sea-level rise », *Global and Planetary Change*, vol. 62/1-2, pp. 77-96, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.001>. [47]
- Wunderling, N. et al. (2021), « Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming », *Earth System Dynamics*, vol. 12/2, pp. 601-619, <http://dx.doi.org/10.5194/esd-12-601-2021>. [69]
- Xu, C. et al. (2020), « Future of the human climate niche », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117/21, pp. 11350-11355, <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1910114117>. [251]
- Yin, J., M. Schlesinger et R. Stouffer (2009), « Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States », *Nature Geoscience*, vol. 2/4, pp. 262-266, <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo462>. [227]

- Zhu, C. et Z. Liu (2020), « Weakening Atlantic overturning circulation causes South Atlantic salinity pile-up », *Nature Climate Change*, vol. 10/11, pp. 998-1003, <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-020-0897-7>. [242]
- Zickfeld, K. (2005), « Is the Indian summer monsoon stable against global change? », *Geophysical Research Letters*, vol. 32/15, <http://dx.doi.org/10.1029/2005gl022771>. [268]

Annex 3.A. Effets en cascade du franchissement d'un point de basculement climatique : arrêt de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC) – méthodologie

Le modèle utilisé pour l'étude de la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique (AMOC) est HadGEM3, version la plus récente du modèle climatique de pointe du Service météorologique du Royaume-Uni (Met Office). Le modèle et ses résultats ont déjà été décrits en détail ailleurs (Williams et al., 2015^[275]), mais succinctement, il s'agit de la configuration Global Coupled 2.0 (GC2) du modèle HadGEM3 (Hewitt et al., 2011^[276]) composée de modèles couplés de l'atmosphère, de l'océan, de la glace de mer et de la surface terrestre.

Des précisions sur la conception expérimentale et les passages du modèle analysés ici ont également été fournies par le passé (Jackson et al., 2015^[248] ; Mecking et al., 2016^[249] ; Williamson et al., 2017^[254]). Deux passages du modèle sont comparés afin d'isoler les effets d'un effondrement de l'AMOC : un passage de contrôle en conditions stables (dans lequel l'AMOC est dans son mode habituel « marche ») et un passage en conditions stables où l'AMOC est en mode « arrêt ». L'effondrement de l'AMOC est simulé selon la méthodologie de Vellinga et Wood (2002^[277]). Il s'agit en l'occurrence de perturber la salinité dans les couches supérieures de l'Atlantique Nord, de manière à inhiber la convection profonde, ce qui a pour effet d'interrompre rapidement l'AMOC (absence de la branche descendante de l'AMOC, c'est-à-dire l'AMOC en mode « arrêt »).

Cette « méthode » d'arrêt de l'AMOC n'est pas réaliste. En fait, dans les projections du réchauffement climatique, la cause la plus probable d'un effondrement de l'AMOC est l'augmentation progressive des apports d'eau douce provenant du ruissellement dans l'Arctique et de la fonte de l'inlandsis du Groenland. Cette méthode est néanmoins utile pour étudier les impacts d'un effondrement de l'AMOC.

Les perturbations de la salinité sont appliquées aux 536 mètres supérieurs de l'océan Atlantique et de l'océan Arctique au nord du 20^e parallèle nord, chaque année en décembre, pendant les dix premières années seulement. Chaque perturbation de la salinité équivaut à ajouter de l'eau douce en continu au rythme de 1 Sv (1 Sv=10⁶ m³/s) pendant dix ans (soit un total de 10 Sv-ans). Pour donner une idée de l'ampleur de cette perturbation annuelle, un flux d'eau douce de 1 Sv provenant de l'inlandsis du Groenland ferait fondre celui-ci entièrement en neuf ans. Le passage AMOC en mode « arrêt » est intégré pour un total de 450 ans à partir du début des perturbations de la salinité. Aucun forçage externe n'est appliqué au modèle, hormis les cycles diurnes et annuels des flux radiatifs, et les concentrations atmosphériques de CO₂ sont fixées aux niveaux de 1978.

À mesure que les perturbations sont appliquées, l'AMOC s'effondre à partir de sa valeur stable d'environ 15 Sv (fonction de courant maximum à 26.5° N) dans le passage de contrôle et reste très faible pendant toute la période de simulation du modèle (450 ans). En conséquence, le transport de chaleur méridien dans l'océan Atlantique à 30° N est réduit de moitié, passant d'environ 1 à environ 0.5 PW, et la température de l'air en surface (TAS) diminue d'environ 4 °C dans l'Atlantique Nord (Jackson et al., 2015^[248]). La simulation AMOC en mode « arrêt » est à peu près stationnaire 60 ans après la fin des perturbations de la salinité. Cependant, le maximum de la fonction de courant de l'AMOC à 26.5° N

présente une tendance ascendante très lente, atteignant environ 5 Sv à la fin des 450 ans. Plus au nord, cependant, il n'existe aucun signe de rétablissement de l'AMOC (Mecking et al., 2016^[249]).

Dans un premier temps, les impacts climatiques d'un effondrement de l'AMOC seul, sans le réchauffement climatique supplémentaire le plus susceptible d'accompagner un effondrement de l'AMOC dans tout scénario futur réaliste, sont isolés. Pour analyser les impacts isolés d'un effondrement de l'AMOC, on prend la différence des moyennes sur 30 ans du passage de contrôle et du passage AMOC en mode « arrêt » une fois la simulation à peu près stationnaire. Suivant une approche analogue à celle utilisée par Vellinga et Wood (2007^[273]), l'analyse est étendue pour inclure les impacts d'un effondrement de l'AMOC en présence d'un état climatique futur plus réaliste. Ce faisant, elle tient compte des effets supplémentaires du réchauffement climatique en appliquant le scénario futur SSP1-2.6 du modèle HadGEM3-GC31-MM (Williams et al., 2015^[275]). Le modèle utilise la configuration Global Coupled 3.1 (GC31) du modèle HadGEM3 et présente les mêmes résolutions atmosphériques et océaniques que celles utilisées dans les expériences examinant l'impact de l'apport d'eau douce sur l'AMOC. Le scénario de forçage SSP1-2.6 fait référence à la trajectoire socio-économique partagée SSP1 et à la trajectoire de concentration régionale RCP2.6 – trajectoire à émissions faibles et à durabilité élevée (Riahi et al., 2017^[278]).

Pour le scénario SSP1-2.6, le modèle HadGEM3-GC31-MM parvient à un réchauffement climatique moyen de 2.5 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle (2071-2100). On superpose ce réchauffement aux impacts d'un effondrement de l'AMOC, de manière à déterminer l'impact global dans l'éventualité où l'AMOC s'effondrerait à la suite d'un réchauffement planétaire de 2.5 °C par rapport au climat actuel. Comme indiqué dans la section précédente, ce scénario est considéré comme plausible, sa probabilité étant significative même s'il apparaît « improbable » (0-33 %) au sens où l'entend le GIEC.

Notes

¹ Les sécheresses, qui peuvent durer entre plusieurs mois et plusieurs années, constituent à cet égard une exception (Spinoni et al., 2013^[281]). Bien qu'elles puissent être de longue durée, les sécheresses sont classées parmi les phénomènes météorologiques extrêmes (par opposition aux phénomènes qui se manifestent lentement) dans ce chapitre.

² Les données relatives aux pertes économiques comprennent « toutes les pertes financières directement imputables à un phénomène majeur », y compris les dommages sur des bâtiments, des infrastructures, des véhicules à moteur et d'autres actifs physiques, ainsi que « les interruptions d'exploitation directement imputables aux dommages matériels » (Swiss Re Institute, 2021^[279]). Les données englobent tout phénomène ayant entraîné des pertes assurées de plus de 52.7 millions USD, des pertes économiques de plus de 105.4 millions USD, 20 décès ou plus, 50 blessés ou plus ou 2 000 personnes sans abri ou plus. Les phénomènes météorologiques extrêmes désignent les phénomènes que Swiss Re classe dans les catégories principales suivantes : (i) froid, gel ; (ii) sécheresses, feux de brousse, canicules ; (iii) inondations ; (iv) grêle ; ou (v) tempêtes.

³ Les autorités publiques et le secteur de l'assurance ayant amélioré la saisie des données post-catastrophe au fil du temps, la déclaration des pertes économiques a sans doute aussi gagné en exhaustivité. Par conséquent, il est permis de penser qu'une partie de l'augmentation dans le temps des pertes économiques dues aux catastrophes résulte d'une amélioration de la saisie des données.

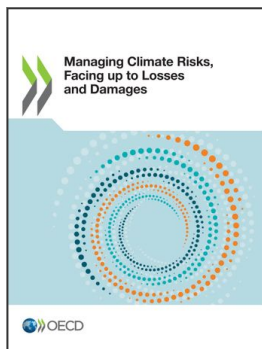
⁴ Le réchauffement entre 1850-1900 et 2011-20 a été estimé à 1.09 °C, avec une fourchette probable de 0.95 à 1.20 °C (GIEC, 2021^[14]).

⁵ La liste des territoires appartenant à cette catégorie diffère selon les publications.

⁶ Si l'on considère les chiffres agrégés au niveau mondial, pour une période de retour de 10 ans, la probabilité de canicules est multipliée par 9.4, tandis que les probabilités de fortes précipitations et de sécheresses sont multipliées par 2.7 et 4.1 (GIEC, 2021^[14]). Il a toutefois été démontré que pour certains phénomènes individuels, tels que la chaleur qui a sévi sur une période prolongée en Sibérie en 2020, l'augmentation de la probabilité est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle d'un climat affranchi de l'influence humaine (Ciavarella et al., 2021^[283]).

⁷ L'ampleur des changements de température dépend des modèles, mais tous s'accordent à dire que l'hémisphère Nord connaîtrait un refroidissement généralisé (Vellinga et Wood, 2002^[277] ; Jacob et al., 2005^[282] ; Vellinga et Wood, 2007^[273] ; Swingedouw et al., 2009^[280] ; Drijfhout, 2015^[65]).

⁸ Une réserve s'impose : il n'y a pas de végétation dynamique dans le modèle – autrement dit, il n'y a pas d'interaction entre la végétation et l'atmosphère. Pour cette raison, on ne peut pas voir si la végétation est modifiée par le changement des précipitations. On peut toutefois supposer que la forêt est stable dans les conditions observées lors du passage AMOC en mode « marche », puis effectuer une comparaison avec les conditions du mode « arrêt de l'AMOC ».



Extrait de :

Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages

Accéder à cette publication :

<https://doi.org/10.1787/55ea1cc9-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

OCDE (2022), « Les impacts du changement climatique et leurs effets en cascade : conséquences en termes de pertes et de dommages », dans *Managing Climate Risks, Facing up to Losses and Damages*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/48047af0-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région. Des extraits de publications sont susceptibles de faire l'objet d'avertissements supplémentaires, qui sont inclus dans la version complète de la publication, disponible sous le lien fourni à cet effet.

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes :

<http://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation>.