

FAQ

Foire aux questions

Coordination éditoriale :

Sophie Berger (France/Belgique) et Sarah L. Connors (France/Royaume-Uni)

Équipe de rédaction :

Richard P. Allan (Royaume-Uni), Paola A. Arias (Colombie), Kyle Armour (États-Unis d'Amérique), Terje Berntsen (Norvège), Lisa Bock (Allemagne), Ruth Cerezo-Mota (Mexique), Kim Cobb (États-Unis d'Amérique), Alejandro Di Luca (Australie, Canada/Argentine), Paul Edwards (États-Unis d'Amérique), Tamsin L. Edwards (Royaume-Uni), Seita Emori (Japon), François Engelbrecht (Afrique du Sud), Veronika Eyring (Allemagne), Piers Forster (Royaume-Uni), Baylor Fox-Kemper (États-Unis d'Amérique), Sandro Fuzzi (Italie), John C. Fyfe (Canada), Nathan P. Gillett (Canada), Nicholas R. Golledge (Nouvelle-Zélande/Royaume-Uni), Melissa I. Gomis (France/Suisse), William J. Gutowski (États-Unis d'Amérique), Rafiq Hamdi (Belgique), Mathias Hauser (Suisse), Ed Hawkins (Royaume-Uni), Nigel Hawtin (Royaume-Uni), Darrell S. Kaufman (États-Unis d'Amérique), Megan Kirchmeier-Young (Canada/États-Unis d'Amérique), Charles Koven (États-Unis d'Amérique), June-Yi Lee (République de Corée), Sophie Lewis (Australie), Jochem Marotzke (Allemagne), Valérie Masson-Delmotte (France), Thorsten Mauritsen (Suède/Danemark), Thomas K. Maycock (États-Unis d'Amérique), Shayne McGregor (Australie), Sebastian Milinski (Allemagne), Olaf Morgenstern (Nouvelle-Zélande/Allemagne), Swapna Panickal (Inde), Joeri Rogelj (Royaume-Uni/Belgique), Maisa Rojas (Chili), Alex C. Ruane (États-Unis d'Amérique), Bjørn H. Samset (Norvège), Trude Storelvmo (Norvège), Sophie Szopa (France), Jessica Tierney (États-Unis d'Amérique), Russell S. Vose (États-Unis d'Amérique), Masahiro Watanabe (Japon), Sönke Zaehle (Allemagne), Xuebin Zhang (Canada) et Kirsten Zickfeld (Canada/Allemagne).

Ce document compile les questions fréquentes extraites des chapitres du rapport complet. Si vous citez l'une de ces questions fréquentes, merci de faire référence au chapitre dont elle provient (à titre d'exemple, la FAQ 3.1 fait partie du chapitre 3).

Table des matières

Foire aux questions

FAQ 1.1	Notre compréhension du changement climatique est-elle meilleure aujourd'hui qu'au début du GIEC ?	170	FAQ 7.1	Qu'est-ce que le bilan énergétique de la Terre, et que nous apprend-il sur le changement climatique ?	205
FAQ 1.2	Où le changement climatique est-il le plus manifeste ?	173	FAQ 7.2	Quel est le rôle des nuages dans un climat qui se réchauffe ?	207
FAQ 1.3	Quels sont les enseignements du climat passé pour l'avenir ?	175	FAQ 7.3	Qu'est-ce que la sensibilité du climat à l'équilibre et en quoi est-elle reliée au réchauffement à venir ?	209
FAQ 2.1	La température de la Terre a déjà varié par le passé. En quoi le réchauffement actuel est-il différent ?	177	FAQ 8.1	Comment le changement d'affectation des terres influence-t-il le cycle de l'eau ?	211
FAQ 2.2	Quelles sont les preuves du changement climatique ?	179	FAQ 8.2	Les crues deviendront-elles plus sévères ou plus fréquentes en raison du changement climatique ?	213
FAQ 3.1	Comment savons-nous que les humains sont responsables du changement climatique ?	181	FAQ 8.3	Quelles sont les causes des sécheresses, et le changement climatique va-t-il les aggraver ?	215
FAQ 3.2	Qu'est-ce que la variabilité naturelle et comment a-t-elle influencé les changements climatiques récents ?	183	FAQ 9.1	Est-ce possible d'inverser la poursuite de la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ? Combien de temps faudrait-il pour qu'elles se reconstituent ?	217
FAQ 3.3	Les modèles climatiques s'améliorent-ils ?	185	FAQ 9.2	Quelle sera l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies ?	219
FAQ 4.1	Comment le climat va-t-il changer au cours des vingt prochaines années ?	187	FAQ 9.3	Le Gulf Stream va-t-il s'arrêter ?	221
FAQ 4.2	Au bout de combien de temps verrons-nous les effets d'une réduction des émissions de dioxyde de carbone ?	189	FAQ 10.1	Comment peut-on fournir des informations climatiques utiles aux parties prenantes régionales ?	223
FAQ 4.3	Pour un niveau donné de réchauffement planétaire, quelles sont les structures spatiales du changement climatique ?	191	FAQ 10.2	Pourquoi les villes sont-elles des « points chauds » du réchauffement climatique ?	225
FAQ 5.1	L'élimination naturelle du carbone de l'atmosphère s'affaiblit-elle ?	193	FAQ 11.1	Quels sont les changements des extrêmes climatiques par rapport aux changements des moyennes climatiques ?	227
FAQ 5.2	Le dégel du pergélisol peut-il sensiblement renforcer le réchauffement planétaire ?	195	FAQ 11.2	Le changement climatique d'origine humaine va-t-il entraîner l'occurrence d'extrêmes sans précédent ?	229
FAQ 5.3	Le changement climatique pourrait-il être inversé en éliminant du dioxyde de carbone de l'atmosphère ?	197	FAQ 11.3	Le changement climatique est-il la cause de cet événement extrême survenu récemment dans mon pays ?	231
FAQ 5.4	Que sont les budgets carbone ?	199	FAQ 12.1	Qu'est-ce qu'un facteur climatique générateur d'impact (CID) ?	233
FAQ 6.1	Que sont les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie et quels effets ont-ils sur le climat ?	201	FAQ 12.2	Que sont les seuils climatiques, et pourquoi sont-ils importants ?	235
FAQ 6.2	Quels sont les liens entre la limitation du changement climatique et l'amélioration de la qualité de l'air ?	203	FAQ 12.3	Comment le changement climatique va-t-il affecter les caractéristiques régionales d'un aléa climatique ?	237

FAQ 1.1 | Notre compréhension du changement climatique est-elle meilleure aujourd'hui qu'au début du GIEC ?

Oui, elle est bien meilleure. Dans son premier rapport, publié en 1990, le GIEC concluait que le changement climatique d'origine humaine deviendrait bientôt manifeste, mais ne pouvait encore confirmer que celui-ci était déjà en cours. Aujourd'hui, nous disposons de preuves irréfutables démontrant que le climat a effectivement changé depuis la période préindustrielle et que les activités humaines sont la principale cause de ce changement. Grâce à des données beaucoup plus abondantes et à de bien meilleurs modèles, nous comprenons également mieux comment l'atmosphère interagit avec l'océan, la glace, la neige, les écosystèmes et les terres émergées de notre planète. Les simulations numériques du climat ont aussi considérablement progressé, en représentant beaucoup plus de processus naturels et en fournissant des projections à des résolutions bien plus fines.

Depuis le premier rapport du GIEC en 1990, un grand nombre de nouveaux instruments ont été déployés pour la collecte de données dans l'atmosphère, sur les terres émergées, en mer et depuis l'espace. Ces instruments mesurent la température, les nuages, les vents, la glace, la neige, les courants océaniques, le niveau de la mer, les suies et les poussières désertiques présentes dans l'atmosphère et bien d'autres aspects du système climatique. De nouveaux instruments satellitaires ont aussi apporté une multitude de données de plus en plus fines. Des données complémentaires provenant de systèmes d'observation plus anciens et même de relevés historiques manuscrits continuent d'être incorporées dans les ensembles de données d'observation, et ces ensembles de données sont désormais mieux intégrés et ajustés pour bien tenir compte de l'évolution historique des instruments et des méthodes de mesure. Les carottes glaciaires, les sédiments, les fossiles et d'autres nouveaux éléments probants du passé lointain nous ont beaucoup appris sur les changements intervenus dans le climat de la Terre tout au long de son histoire.

La compréhension des processus du système climatique a aussi progressé. Ainsi, en 1990, la façon dont les profondeurs océaniques réagissent au changement climatique restait encore très mal connue. Aujourd'hui, les reconstructions de température de l'océan profond remontent jusqu'en 1871. Nous savons maintenant que l'océan absorbe la majeure partie de l'excès d'énergie piégé par les gaz à effet de serre et que même l'océan profond se réchauffe. De même, en 1990, les connaissances étaient très limitées sur la manière dont les gigantesques calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique réagiraient au réchauffement ou sur le moment exact où elles le feraient. Aujourd'hui, des données beaucoup plus nombreuses et des modèles plus performants du comportement des calottes glaciaires font apparaître de manière inattendue des taux de fonte élevés qui entraîneront des changements majeurs au cours de ce siècle, notamment une élévation importante du niveau de la mer (FAQ 9.2).

Les principaux facteurs naturels qui contribuent au changement climatique à une échelle de temps de plusieurs décennies à plusieurs siècles sont les éruptions volcaniques et les variations de l'énergie produite par le Soleil. Aujourd'hui, les données montrent que les changements intervenus dans l'énergie solaire incidente depuis 1900 n'ont que faiblement contribué au réchauffement de la planète et mettent en évidence une légère tendance à la baisse depuis les années 1970. Elles montrent aussi que les grandes éruptions volcaniques ont parfois refroidi la planète entière pendant des périodes assez courtes (de quelques années généralement) en injectant des aérosols (fines particules en suspension dans l'air) dans l'atmosphère.

Les principales causes anthropiques du changement climatique sont les gaz à effet de serre capables d'absorber de la chaleur, qui sont émis par la combustion de combustibles fossiles, la déforestation et l'agriculture et qui réchauffent la planète ; et les aérosols comme les sulfates provenant de la combustion du charbon, lesquels ont un effet de refroidissement à court terme qui masque en partie le réchauffement d'origine humaine. Depuis 1990, nous disposons d'observations plus nombreuses et de meilleure qualité de ces facteurs humains ainsi que de meilleurs relevés historiques, ce qui permet d'établir des estimations plus précises de l'influence humaine sur le système climatique (FAQ 3.1).

Si, en 1990, la plupart des modèles climatiques étaient centrés sur l'atmosphère, avec des représentations très simplifiées de l'océan et des terres émergées, les simulations actuelles du système Terre incluent des modèles détaillés de l'océan, de la glace, de la neige, de la végétation et de bien d'autres variables. Un critère de qualité important des modèles est leur aptitude à simuler le climat de la Terre sur la période des relevés instrumentaux (depuis 1850 environ). Plusieurs séries d'évaluations de cette capacité ont eu lieu depuis 1990, selon des méthodes qui sont devenues beaucoup plus rigoureuses et complètes. Dans leur ensemble et à grande échelle, les modèles

FAQ 1.1 (suite)

ont prévu correctement les changements observés dans le cadre de ces évaluations (FAQ 3.3). Comme il est impossible de réaliser une expérience contrôlée en laboratoire sur la Terre proprement dite, les simulations des modèles climatiques permettent de disposer d'une sorte de « Terre de substitution » pour évaluer ce qui se serait passé sans l'influence de l'homme. Ce type d'expériences montre que le réchauffement observé n'aurait pas eu lieu sans l'influence humaine.

Enfin, la compréhension physique théorique prévoit que l'influence humaine sur le système climatique devrait produire certaines structures caractéristiques de changement, que nous retrouvons effectivement dans les observations et les simulations climatiques. À titre d'exemple, les nuits se réchauffent plus vite que les jours, moins de chaleur s'échappe vers l'espace, et la basse atmosphère (troposphère) se réchauffe tandis que la haute atmosphère (stratosphère) s'est refroidie. Ces prévisions confirmées sont autant de preuves que les changements sont principalement induits par l'augmentation des concentrations de GES plutôt que par des causes naturelles.

FAQ 1.1 (suite)

FAQ 1.1: Notre compréhension du changement climatique est-elle meilleure aujourd'hui qu'au début du GIEC ?

Oui. Entre 1990 et 2021, les observations, les modèles et la compréhension du climat se sont améliorés, en même temps que le rôle dominant de l'influence humaine dans le réchauffement planétaire a été confirmé.

Premier
Rapport
d'évaluation du GIEC
(1990)



Sixième
Rapport
d'évaluation du GIEC
(2021)

Niveau de compréhension

Influence humaine sur le climat



Suspecté

Bilan énergétique

Ouvert
(estimations incohérentes)

Bilan du niveau de la mer

Ouvert
(estimations incohérentes)

Observations

Réchauffement planétaire depuis la fin des années 1800

De 0,3 °C à 0,6 °C

Température des terres émergées

Stations de 1887 (1861-1990)

Enregistrements géologiques

5 millions d'années (température)
5 millions d'années (niveau de la mer)
160 000 années (CO₂)

Contenu de chaleur de l'océan à l'échelle du globe

1955-1981 (pour deux régions)

Téledétection par satellite

Température, couverture neigeuse, bilan radiatif de la Terre

Fait établi



Fermé

(entrées = sorties + énergie accumulée)

Fermé

(somme des contributions = élévation observée du niveau de la mer)

De 0,95 °C à 1,2 °C

Jusqu'à 40 000 stations (1750-2020)

65 millions d'années (température)

50 millions d'années (niveau de la mer)

160 000 années (CO₂)

1871-2018 (à l'échelle du globe)

Température, cryosphère, bilan radiatif de la Terre, CO₂, niveau de la mer, nuages, aérosols, couverture terrestre, etc.



Globaux

Modèles climatiques

Les plus récents

Modèles de la circulation générale

Résolution habituelle des modèles

500 km



Principaux éléments Circulation de l'atmosphère et de l'océan



Transfert radiatif



Physique terrestre



Glace de mer



Globaux

Modèles du système Terre

100 km



Régionaux

Modèles à haute résolution

25-50 km



Circulation de l'atmosphère et de l'océan

Transfert radiatif

Physique terrestre

Glace de mer

Chimie atmosphérique

Usage des terres/couverture terrestre

Biogéochimie terrestre et océanique

Interactions des aérosols et des nuages

FAQ 1.1, figure 1 | **Éléments de compréhension, d'observation et de modélisation du climat évalués dans le premier rapport d'évaluation (1990) et le sixième rapport d'évaluation (2021) du GIEC.** Bon nombre d'autres progrès intervenus depuis 1990, parmi lesquels des aspects essentiels liés à la compréhension théorique, aux enregistrements géologiques et à l'attribution du changement climatique à l'influence humaine, ne sont pas repris dans la figure car ils ne peuvent être représentés aisément sous cette forme simple. De plus amples explications sur l'historique des connaissances relatives au climat sont données dans les chapitres d'introduction du quatrième et du sixième rapports d'évaluation du GIEC.

FAQ 1.2 | Où le changement climatique est-il le plus manifeste ?

Les manifestations du changement climatique sont sans équivoque à l'échelle mondiale et de plus en plus visibles à des échelles spatiales plus réduites. Les hautes latitudes de l'hémisphère Nord enregistrent la plus forte hausse des températures, qui a des effets manifestes sur la glace de mer et les glaciers. Le réchauffement est visible également dans les régions tropicales, où les variations naturelles de la température d'une année sur l'autre sont faibles. Des changements à long terme concernant d'autres variables comme les pluies et certains phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes sont également devenus évidents dans de nombreuses régions.

Le réchauffement des terres émergées de la planète a été constaté pour la première fois dès les années 1930. Bien que l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère ait été suggérée comme un élément d'explication, il n'était à cette époque pas certain que le réchauffement observé s'inscrive dans une tendance à long terme ou dans une fluctuation naturelle : le réchauffement planétaire n'était pas encore devenu visible. Mais la planète a continué de se réchauffer et, dans les années 1980, les changements de température sont devenus évidents ou, en d'autres termes, le signal avait émergé.

Imaginez que vous ayez suivi l'évolution des températures au même endroit pendant les 150 dernières années. Qu'auriez-vous constaté ? À quel moment le réchauffement serait-il devenu repérable dans vos données ? Les réponses à ces questions diffèrent selon l'endroit de la planète où vous vous trouvez.

Que l'on se fonde sur les observations ou les simulations de modèles climatiques, il est établi que les plus fortes tendances de réchauffement à long terme concernent les hautes latitudes de l'hémisphère Nord et que les tendances les plus réduites de réchauffement au-dessus des terres émergées concernent les régions tropicales. Toutefois, c'est dans les tropiques que les variations de la température d'une année sur l'autre sont les plus faibles, ce qui signifie que les changements y sont également visibles, par rapport à la gamme de ce qui a été connu précédemment (FAQ 1.2, figure 1).

Les changements de température ont également tendance à être plus visibles sur les terres émergées qu'en haute mer et sont souvent plus visibles dans les régions particulièrement vulnérables au changement climatique. On s'attend à ce que les changements futurs continuent à montrer les signaux les plus importants aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, mais avec le réchauffement le plus visible dans les tropiques. Dans ce contexte, ce sont les tropiques qui bénéficieront le plus de l'atténuation du changement climatique, car limiter le réchauffement planétaire permettra aussi d'y limiter l'ampleur des modifications climatiques par rapport à ce qui avait été connu précédemment.

Des changements d'autres variables climatiques ont aussi émergé à des échelles spatiales plus réduites. Ainsi, des changements de la moyenne des précipitations deviennent clairement visibles dans certaines régions, mais néanmoins pas partout, principalement du fait que les variations naturelles des précipitations sont souvent importantes d'une année sur l'autre par rapport à l'ampleur des tendances à long terme. Toutefois, les pluies extrêmes sont de plus en plus intenses dans de nombreuses régions, ce qui peut accroître les impacts des inondations survenant à l'intérieur des terres (FAQ 8.2). Le niveau de la mer s'élève aussi clairement sur de nombreuses côtes, ce qui amplifie les impacts des inondations dues aux ondes de tempête côtières, même si le nombre de tempêtes atteignant les terres n'augmente pas. La diminution de quantité de la glace de mer de l'Arctique est visible, tant pour son extension que pour son épaisseur, ce qui a des conséquences pour les écosystèmes polaires.

L'ampleur du changement n'est pas nécessairement ce qui détermine les impacts liés au changement climatique. Ce qui compte le plus peut être la vitesse des changements, ou l'ampleur du changement par rapport aux variations naturelles du climat auxquelles les écosystèmes et la société sont adaptés. Plus le climat s'éloigne de ce qui était précédemment connu et atteint un état sans précédent, plus les impacts peuvent s'amplifier, ainsi que les difficultés pour s'y adapter.

Le moment où une tendance à long terme peut être distinguée des variations naturelles à plus court terme et la manière dont cela se produit dépendent de l'aspect du climat considéré (température, précipitations, glaces de mer, niveau de la mer, etc.), de la région considérée, de la vitesse des changements et de l'ampleur et de la temporalité des variations naturelles. Pour évaluer les impacts locaux du changement climatique, tant l'ampleur du changement que l'amplitude des variations naturelles sont importantes.

FAQ 1.2 (suite)

FAQ 1.2: Où le changement climatique est-il le plus manifeste ?

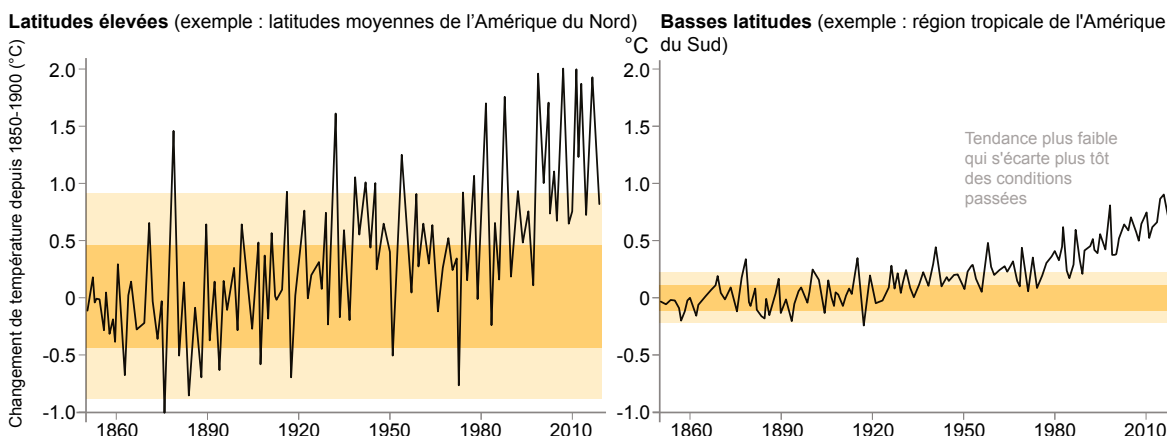
Les changements de température sont les plus manifestes dans les régions où les variations naturelles sont plus faibles.



Estimation de :

2 écarts types de variations naturelles d'une année à l'autre

1 écart type de variations naturelles d'une année à l'autre



FAQ 1.2, figure 1 | Variations observées des températures régionales depuis 1850 (données de Berkeley Earth). Dans les régions de latitude élevée, comme celles des latitudes moyennes de l'Amérique du Nord (40°N-64°N, 140°W-60°W, à gauche), le réchauffement a été plus prononcé que dans les régions situées à des latitudes plus basses, comme l'Amérique du Sud tropicale (10°S-10°N, 84°W-16°W, à droite), mais les variations naturelles sont aussi beaucoup plus amples aux latitudes élevées (les ombres plus foncées et plus claires représentent 1 et 2 écarts types, respectivement, des variations naturelles d'une année sur l'autre). Le signal du changement observé de la température a émergé plus tôt en Amérique du Sud tropicale qu'aux latitudes moyennes de l'Amérique du Nord, même si les changements y ont été de moindre ampleur. (À noter que ces régions ont été choisies parce qu'elles disposaient de relevés d'observation portant sur une période plus longue ; voir la figure 1.14 pour d'autres régions).

FAQ 1.3 | Quels sont les enseignements du climat passé pour l'avenir ?

Par le passé, la Terre a connu des périodes prolongées de concentrations élevées de gaz à effet de serre qui ont entraîné une élévation des températures mondiales et du niveau de la mer. L'étude de ces périodes chaudes passées nous renseigne sur les conséquences potentielles à long terme d'une augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre entraîne de profonds changements dans le système Terre, parmi lesquels le réchauffement planétaire, l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation des phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes, l'acidification de l'océan et des bouleversements des écosystèmes (FAQ 2.2 et FAQ 7.1). La plupart des observations instrumentales du climat ont démarré au cours du XXe siècle, lorsque les émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines sont devenues le principal facteur à l'origine des changements du climat terrestre (FAQ 3.1).

À l'heure où les scientifiques cherchent à affiner notre compréhension du système climatique de la Terre et de son évolution possible pendant les décennies et les siècles à venir, les états passés du climat apportent un éclairage important. Les données concernant ces états passés aident à faire le lien entre les facteurs climatiques naturels et l'historique des changements de la température globale, du niveau global de la mer, du cycle du carbone, de la circulation océanique et des tendances climatiques régionales, y compris les extrêmes climatiques. Guidés par ces données, les scientifiques utilisent des modèles du système Terre pour déterminer la chaîne d'événements sous-jacente aux transitions entre les états climatiques passés (FAQ 3.3). C'est un point important car, dans le cadre du changement climatique actuel comme lors des changements climatiques passés, certains aspects du système Terre (comme la température de surface) répondent aux changements qui interviennent dans les gaz à effet de serre sur une échelle de temps allant de quelques décennies à quelques siècles, tandis que d'autres (comme le niveau de la mer et le cycle du carbone) réagissent sur une échelle comprise entre des siècles et des millénaires (FAQ 5.3). Ainsi, les états climatiques passés constituent des bancs d'essai essentiels pour les simulations des modèles climatiques, améliorant notre compréhension des séquences, du rythme et de l'ampleur des changements climatiques à venir dans les prochaines décennies à prochains millénaires.

L'analyse des périodes chaudes antérieures provoquées par des facteurs naturels peut nous aider à comprendre comment des aspects essentiels du système climatique évoluent en réaction au réchauffement. Ainsi, un état antérieur chaud du climat s'est produit il y a environ 125 000 ans, pendant la dernière période interglaciaire, lorsque des variations graduelles de l'orbite de la Terre ont déclenché une série de changements qui ont entraîné un réchauffement de la planète de l'ordre de 0,5 °C à 1,5 °C et une élévation du niveau de la mer d'environ 5 à 10 m par rapport à la période allant de 1850 à 1900, même si les concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère étaient comparables aux valeurs de 1850-1900 (FAQ 1.3, figure 1). Les études de modélisation soulignent que le réchauffement estival accru aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord pendant cette période a provoqué une fonte généralisée de la neige et de la glace, ce qui a réduit la réflectivité de la planète et accru l'absorption de l'énergie solaire par la surface de la Terre. Cela a suscité un réchauffement à l'échelle planétaire, qui a lui-même entraîné une perte de glace supplémentaire et une élévation du niveau de la mer. Ces cycles de rétroaction positive autorenforcés sont un trait omniprésent du système climatique terrestre, aux conséquences évidentes pour le changement climatique futur si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent. Dans le cas de l'élévation du niveau de la mer, ces cycles ont évolué sur plusieurs siècles à millénaires, ce qui nous rappelle que les rythmes et l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer au XXIe siècle ne sont qu'une petite fraction de celle qui se produira en fin de compte lorsque le système Terre se sera entièrement ajusté aux niveaux actuels de réchauffement de la planète.

Il y a environ 3 millions d'années, à l'époque du Pliocène, la Terre a connu une période prolongée de températures élevées (de 2,5 °C à 4 °C supérieures à celles de 1850-1900) et de hauts niveaux marins (de 5 à 25 m supérieurs à ceux de 1850-1900), associés à des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone comparables à celles d'aujourd'hui. Le fait que les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone du Pliocène aient été comparables à celles d'aujourd'hui, parallèlement à des températures planétaires et à un niveau de la mer nettement plus élevés, traduit la différence entre un système Terre qui s'est entièrement ajusté au changement des facteurs naturels (le Pliocène) et un système où les concentrations de gaz à effet de serre, la température et le niveau de la mer continuent encore d'augmenter (période actuelle). Pour une grande part, la transition vers l'état climatique du Pliocène – s'agissant de ses causes principales, du rôle des cycles qui ont accéléré ou ralenti la

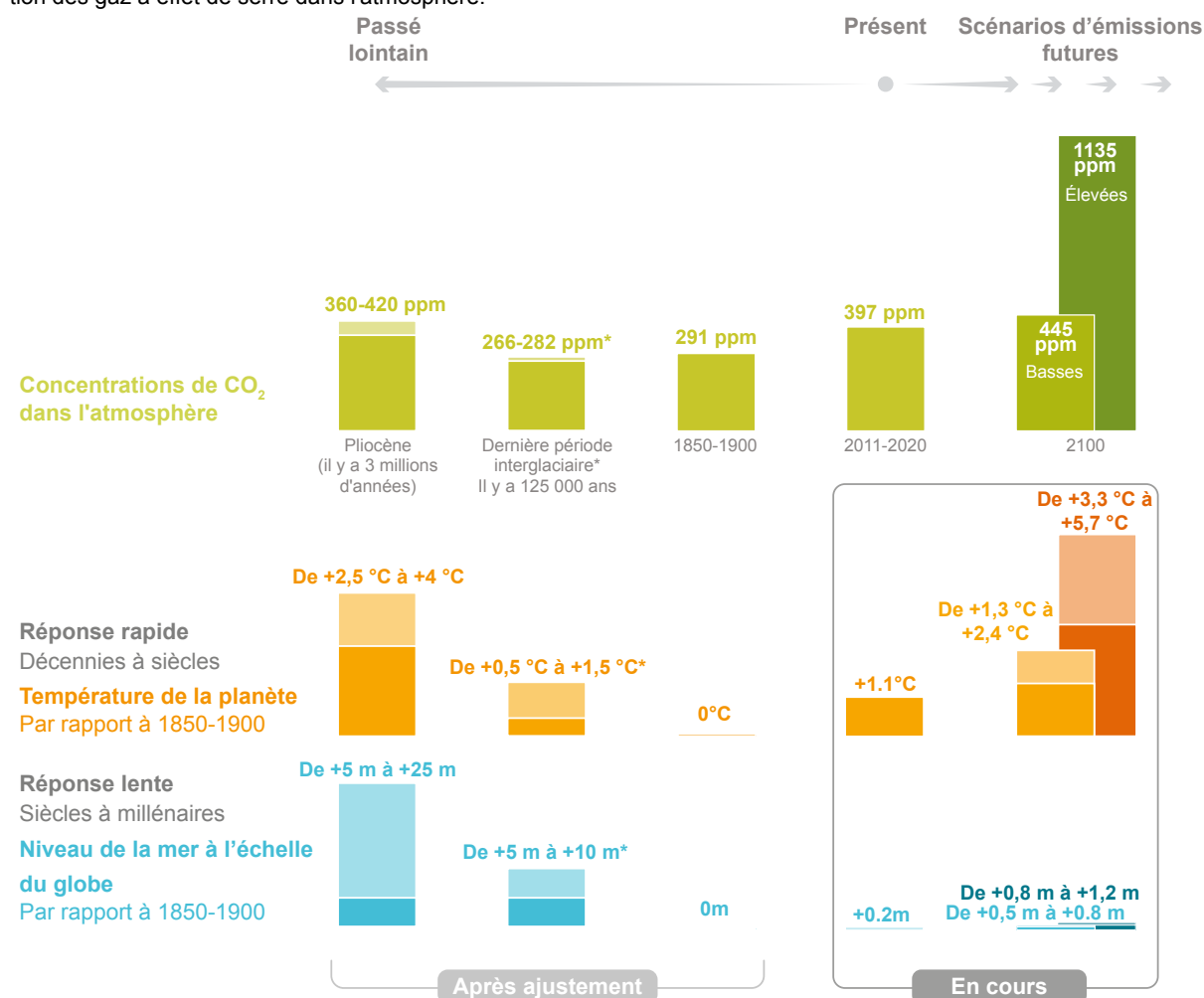
FAQ 1.3 (suite)

transition et du taux de changement d'indicateurs climatiques comme le niveau de la mer – reste un sujet d'étude très actif pour les climatologues, qui combinent observations paléoclimatiques et modélisation du système Terre. Les résultats de ces recherches pourraient aider à réduire les incertitudes importantes concernant l'estimation de l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2300, qui va de 0,3 m à 3 m au-dessus du niveau de 1850-1900 (dans un scénario à faibles émissions) à 16 m au-dessus de ce niveau (dans un scénario à très fortes émissions comportant une accélération de la désintégration structurelle de la calotte glaciaire aux pôles).

Si le réchauffement actuel est inhabituel à plusieurs égards dans le contexte du passé géologique récent (FAQ 2.1), les états climatiques chauds passés nous rappellent sans ménagement que l'ajustement à long terme aux concentrations actuelles de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ne fait que commencer. Il se poursuivra pendant les siècles et les millénaires à venir.

FAQ 1.3: Quels sont les enseignements du climat passé pour l'avenir ?

Les périodes chaudes passées nous renseignent sur les conséquences possibles d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère.



*Sous l'effet de changements dans l'orbite de la Terre, qui ont redistribué l'énergie solaire incidente entre les saisons et les latitudes.

FAQ 1.3, figure 1 | Comparaison entre le passé, le présent et le futur. Schéma des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, de la température mondiale et du niveau de la mer à l'échelle du globe au cours des périodes chaudes précédentes, par rapport à 1850-1900, à aujourd'hui (2011-2020) et aux scénarios de changement climatique futurs (2100) correspondant à un scénario à faibles émissions (SSP1-2.6 ; barres de couleur claire) et à un scénario à très fortes émissions (SSP5-8.5 ; barres de couleur foncée).

FAQ 2.1 | La température de la Terre a déjà varié par le passé. En quoi le réchauffement actuel est-il différent ?

Le climat de la Terre a toujours évolué naturellement, mais le réchauffement récent a une ampleur et un rythme inhabituels. Le réchauffement récent a inversé une lente tendance au refroidissement à long terme, et les résultats issus de la recherche indiquent que la température à la surface du globe est plus élevée aujourd'hui qu'elle ne l'a été depuis des millénaires.

Si le climat peut être caractérisé par de nombreuses variables, la température est un indicateur essentiel de l'état général de celui-ci, et la température à la surface du globe est fondamentale pour caractériser et comprendre le changement climatique planétaire, y compris le bilan énergétique de la Terre. Un vaste ensemble d'éléments probants géologiques montre que la température a changé tout au long de l'histoire de la Terre. Diverses archives naturelles du monde entier, comme les sédiments océaniques et lacustres, la glace des glaciers et les anneaux de croissance des arbres, montrent que la planète a été plus froide à certaines époques et plus chaude à d'autres. Si le degré de confiance dans la quantification des changements de température à grande échelle diminue généralement d'autant plus que la période considérée est éloignée dans le temps, les scientifiques n'en sont pas moins en mesure de relever au moins quatre différences majeures entre le réchauffement récent et ceux du passé.

Le climat se réchauffe presque partout. Pendant les décennies et les siècles des 2 000 dernières années, certaines régions se sont réchauffées davantage que la moyenne planétaire et, en même temps, d'autres régions se sont refroidies. Ainsi, entre le Xe et le XIIIe siècle, la région de l'Atlantique Nord s'est réchauffée davantage que beaucoup d'autres régions. Par comparaison, la structure du réchauffement récent de surface est globalement plus uniforme que cela n'a été le cas pour les autres fluctuations climatiques décennales à centennales des deux derniers millénaires au minimum.

Le climat se réchauffe rapidement. Au cours des deux derniers millions d'années, le climat de la Terre a oscillé entre des périodes interglaciaires relativement chaudes et des périodes glaciaires plus froides, pendant lesquelles des calottes glaciaires recouvraient de vastes zones des continents de l'hémisphère Nord. Les intervalles de réchauffement rapide ont coïncidé avec l'effondrement de ces calottes glaciaires, préluant à des périodes interglaciaires comme la période holocène actuelle, qui a débuté il y a environ 12 000 ans. Pendant la transition entre la dernière période glaciaire et la période interglaciaire actuelle, la température a augmenté d'environ 5 °C au total. Ce changement a pris environ 5 000 ans, le taux de réchauffement maximum atteignant environ 1,5 °C par millénaire, même si la transition n'a pas été régulière. En revanche, la surface de la Terre s'est réchauffée d'environ 1,1 °C depuis 1850-1900. Cependant, même la meilleure reconstruction de la température à la surface du globe pendant la dernière déglaciation est d'une résolution trop faible pour qu'une comparaison directe soit possible avec une période aussi courte que les 150 dernières années. Mais on dispose pour les 2 000 dernières années de relevés à plus haute résolution qui montrent que le taux de réchauffement de la planète a été plus élevé ces 50 dernières années qu'au cours de toute autre période de 50 ans.

Le réchauffement récent a inversé une tendance à long terme au refroidissement de la planète. À la suite de la dernière grande période glaciaire, la température à la surface du globe a atteint un pic il y a 6 500 ans environ, puis s'est refroidie lentement. Cette tendance au refroidissement à long terme a été ponctuée de décennies et de siècles plus chauds. Ces fluctuations ont été mineures par rapport au réchauffement persistant et manifeste qui a débuté au milieu du XIXe siècle, où la tendance au refroidissement à l'échelle des millénaires a été inversée.

Cela fait longtemps qu'il n'a pas fait aussi chaud. La température de surface de la dernière décennie, moyennée pour le globe, a probablement été plus élevée que lorsque la tendance longue au refroidissement a commencé il y a environ 6 500 ans. Dans ce cas, il nous faut remonter au moins jusqu'à la période interglaciaire précédente, il y a environ 125 000 ans, pour trouver des éléments probants attestant de températures pluricentennales à la surface du globe plus élevées qu'aujourd'hui.

Les fluctuations de température antérieures ont été provoquées par des processus naturels à grande échelle, tandis que le réchauffement actuel est essentiellement dû à des causes anthropiques (voir, par exemple, FAQ 1.3, FAQ 3.1). Mais il est essentiel de comprendre comment et pourquoi les températures ont changé par le passé pour comprendre le réchauffement actuel et comment les influences anthropiques et naturelles vont interagir pour déterminer ce qui se produira à l'avenir. L'étude des changements climatiques passés permet aussi d'établir clairement que, contrairement aux changements climatiques précédents, les effets du réchauffement récent

FAQ 2.1 (suite)

s'ajoutent à d'autres facteurs de stress qui rendent les humains et la nature vulnérables aux changements comme jamais auparavant (à titre d'exemple, voir FAQ 11.2 et FAQ 12.3).

FAQ 2.1: En quoi le réchauffement actuel est-il différent des variations antérieures ?

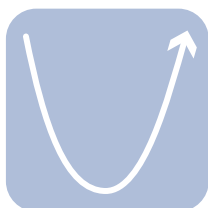
Le climat a toujours changé, mais un réchauffement tel que celui des dernières décennies ne s'est pas produit depuis des millénaires ou plus.



Le climat se réchauffe pratiquement partout



Le climat se réchauffe rapidement



Ce réchauffement a inversé une tendance de long terme au refroidissement



Cela fait longtemps qu'il n'a pas fait aussi chaud

FAQ 2.1, figure 1 | Preuves du caractère inhabituel du réchauffement récent.

FAQ 2.2 | Quelles sont les preuves du changement climatique ?

Les preuves du changement climatique ne se résument pas à l'augmentation des températures en surface. C'est tout un ensemble d'indicateurs qui conduit à la conclusion irréfutable que nous assistons à des changements rapides de nombreux aspects du climat de la planète. Nous observons des changements dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère. De nos connaissances scientifiques se dégage l'image cohérente d'un monde qui se réchauffe.

L'évolution du climat est observée depuis longtemps. Depuis les premiers scientifiques qui ont effectué des observations météorologiques aux XVIe et XVIIe siècles jusqu'à aujourd'hui, on a assisté à une révolution dans nos capacités d'observation et de diagnostic de l'évolution du climat. Nous sommes capables aujourd'hui d'observer divers aspects de notre système climatique depuis l'espace, à partir d'avions et de ballons météorologiques, au moyen de diverses technologies d'observation au sol et à l'aide d'instruments capables d'effectuer des mesures à de grandes profondeurs dans l'océan.

Les changements observés dans les principaux indicateurs indiquent un réchauffement des terres émergées. La température à la surface du globe a augmenté depuis la fin du XIXe siècle, et des changements sont visibles pour de nombreux types d'extrêmes de température qui ont des répercussions importantes pour la société. Depuis le milieu des années 1950, la troposphère (c'est-à-dire les quelques kilomètres qui constituent la partie inférieure de l'atmosphère) s'est réchauffée, et les précipitations ont augmenté sur les terres émergées. L'humidité spécifique à proximité de la surface (c'est-à-dire la vapeur d'eau) augmente au-dessus des terres émergées depuis au moins les années 1970. Certains aspects de la circulation atmosphérique ont aussi évolué depuis le milieu du XXe siècle, notamment un déplacement vers les pôles des trajectoires des tempêtes aux latitudes moyennes.

Les changements concernant l'océan mondial indiquent aussi un réchauffement. La température moyenne à la surface de l'océan a augmenté à l'échelle du globe depuis la fin du XIXe siècle. Le contenu de chaleur de l'océan mondial s'est accru depuis le XIXe siècle, plus de 90 % de l'excès d'énergie accumulé dans le système climatique étant stocké dans l'océan. Ce réchauffement de l'océan a provoqué une dilatation des eaux océaniques, ce qui a contribué à l'augmentation du niveau de la mer à l'échelle du globe au cours du siècle dernier. L'acidité relative de l'océan a également augmenté depuis le début du XXe siècle, en raison de l'absorption du dioxyde de carbone de l'atmosphère, et l'appauvrissement en oxygène des couches supérieures de l'océan est évident depuis les années 1970.

Des changements importants sont aussi manifestes dans la cryosphère, partie de la Terre où l'eau est présente sous forme de neige ou de glace du fait du gel saisonnier ou permanent. Une réduction de la zone de glace de mer de l'Arctique et de son épaisseur et des changements de l'étendue de glace de mer de l'Antarctique se sont produits depuis le milieu des années 1970. Le manteau neigeux printanier de l'hémisphère Nord a diminué depuis la fin des années 1970, parallèlement au réchauffement et au dégel du pergélisol (sol gelé en permanence) que l'on a pu observer. Les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique régressent, de même que la plupart des glaciers partout dans le monde, ce qui contribue fortement à l'élévation observée du niveau de la mer.

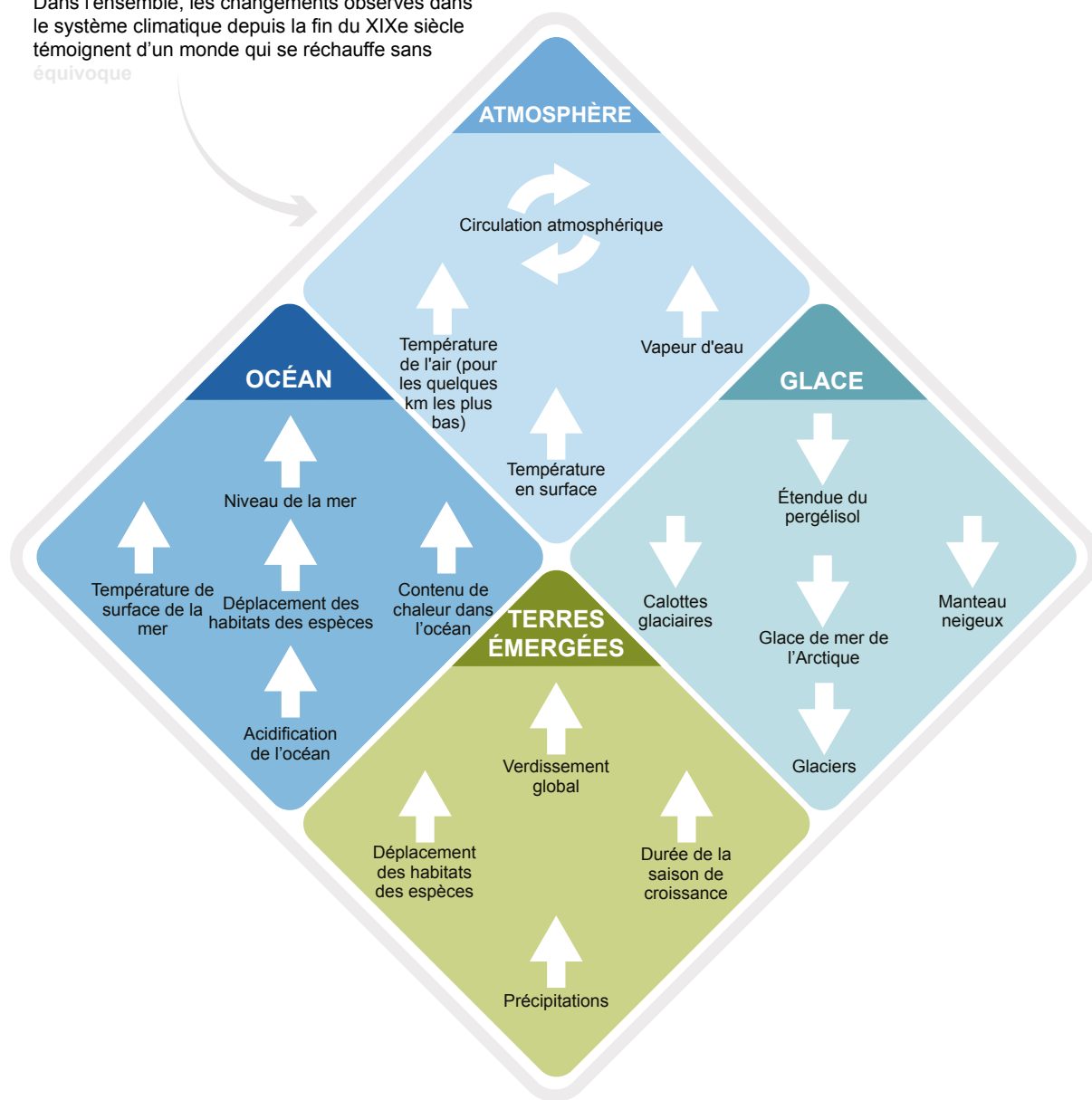
De nombreux aspects de la biosphère sont également en train de changer. Les études écologiques à long terme portant sur le siècle dernier font ressortir un mouvement général vers les pôles et vers des altitudes plus élevées de nombreuses espèces terrestres. La surface et/ou la masse foliaires (c'est-à-dire l'état de verdissement de la planète) ont augmenté depuis le début des années 1980, et la durée de la saison de croissance de la végétation s'est allongée dans la plupart des régions extratropicales de l'hémisphère Nord depuis au moins le milieu du XXe siècle. Il existe aussi des preuves solides que divers indicateurs phénologiques (comme le cycle de migration des poissons) concernant de nombreuses espèces marines ont changé au cours des cinquante dernières années.

Un changement est clairement visible dans de nombreuses composantes du système climatique. Il a été observé à l'aide d'un très large éventail de techniques et analysé de façon indépendante par de nombreuses équipes partout dans le monde. Ces changements indiquent de manière cohérente que le système climatique a connu un réchauffement rapide depuis la révolution industrielle.

FAQ 2.2 (suite)

FAQ 2.2: Quelles sont les preuves du changement climatique ?

Dans l'ensemble, les changements observés dans le système climatique depuis la fin du XIXe siècle témoignent d'un monde qui se réchauffe sans équivoque



FAQ 2.2, figure 1 | Synthèse des changements significatifs observés dans le système climatique au cours des dernières décennies. Les flèches ascendantes, descendantes et circulaires indiquent des augmentations, des diminutions et des changements, respectivement. Des analyses indépendantes des changements attendus pour de nombreuses composantes du système climatique dans un monde qui se réchauffe montrent des tendances cohérentes avec le réchauffement. Notez que cette liste n'est pas exhaustive.

FAQ

FAQ 3.1 | Comment savons-nous que les humains sont responsables du changement climatique ?

Le rôle dominant des humains dans le changement climatique récent est évident. Cette conclusion repose sur une synthèse d'informations provenant de multiples éléments probants, parmi lesquels des observations directes des changements récents du climat de la Terre ; des analyses d'anneaux de croissance des arbres, de carottes glaciaires et d'autres relevés à long terme qui caractérisent la manière dont le climat a changé au cours du temps ; et des simulations numériques reposant sur la physique fondamentale qui régit le système climatique.

Le climat est influencé par toute une série de facteurs. Il existe deux principaux facteurs naturels de variation du climat sur des échelles de temps allant de décennies à des siècles. Le premier est la variation de l'activité solaire, qui modifie la quantité d'énergie incidente provenant du Soleil. Le second tient aux grandes éruptions volcaniques, lesquelles augmentent le nombre de particules fines (aérosols) de la haute atmosphère qui réfléchissent la lumière du soleil et refroidissent la surface, effet qui peut durer quelques années (voir aussi FAQ 3.2). Les principaux facteurs humains du changement climatique sont l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et d'aérosols provenant de la combustion de combustibles fossiles, de l'utilisation des terres et d'autres sources. Les gaz à effet de serre piègent le rayonnement infrarouge près de la surface, ce qui réchauffe le climat. Les aérosols, comme ceux qui sont produits naturellement par les volcans, refroidissent en moyenne le climat en augmentant la réflexion de la lumière solaire. De multiples éléments probants montrent que les facteurs humains sont la principale cause du changement climatique récent.

La concentration des principaux gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane et oxyde nitreux) augmente actuellement à un rythme sans précédent depuis au moins 800 000 ans. Il ressort clairement de plusieurs éléments probants que les activités humaines sont à l'origine de cette augmentation. La physique fondamentale sur laquelle repose l'effet de réchauffement des gaz à effet de serre sur le climat est comprise depuis plus d'un siècle, et notre compréhension actuelle a été utilisée pour mettre au point la dernière génération de modèles climatiques (voir FAQ 3.3). Comme les modèles de prévision météorologique, les modèles climatiques représentent l'état de l'atmosphère sur une grille et en simulent l'évolution dans le temps à partir des principes de la physique. Ils intègrent aussi l'océan, la glace de mer et les principaux processus importants pour le climat et le changement climatique.

Les résultats montrent systématiquement que ces modèles climatiques ne sont capables de reproduire le réchauffement observé (ligne noire à la figure 1 de la FAQ 3.1) que s'ils tiennent compte des effets des activités humaines (bande grise à la figure 1 de la FAQ 3.1), en particulier l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Ces modèles climatiques indiquent un effet de réchauffement dominant dû à l'augmentation des gaz à effet de serre (bande rouge, qui illustre les effets de réchauffement des gaz à effet de serre en tant que tels), qui a été en partie contrebalancé par l'effet de refroidissement dû à l'augmentation des aérosols atmosphériques (bande bleue). En revanche, les simulations qui tiennent compte uniquement des processus naturels, dont la variabilité interne liée à El Niño et autres variations analogues, ainsi que de la variation de l'activité du Soleil et des émissions provenant des grandes éruptions volcaniques (bande verte à la figure 1 de la FAQ 3.1), ne sont pas en mesure de reproduire le réchauffement observé. Le fait que les simulations incluant uniquement les processus naturels montrent des augmentations de température bien plus faibles indique que les processus naturels ne peuvent à eux seuls expliquer le fort rythme de réchauffement observé. Le rythme observé ne peut être reproduit que lorsque l'influence humaine est ajoutée aux simulations.

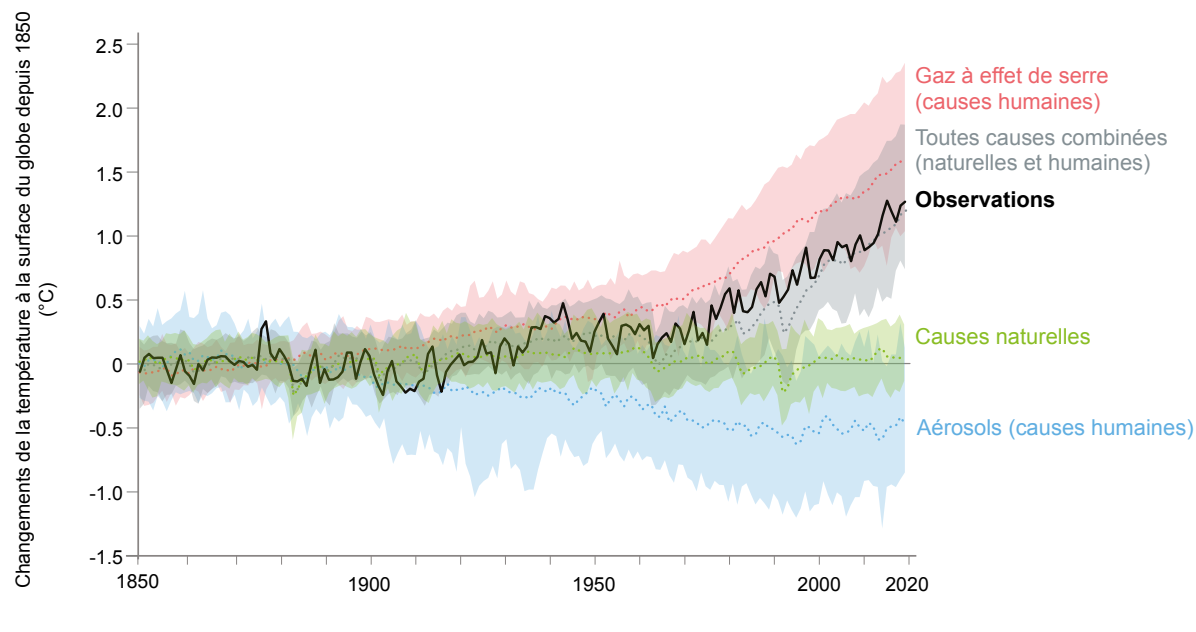
De plus, l'effet dominant des activités humaines est visible non seulement dans le réchauffement de la température de surface du globe, mais aussi dans la structure combinant réchauffement de la basse atmosphère et refroidissement de la stratosphère, dans le réchauffement de l'océan, dans la fonte de la glace de mer et dans de nombreux autres changements observés. Un élément probant supplémentaire démontrant le rôle des humains dans le changement climatique provient de la comparaison du rythme de réchauffement observé pour les dernières décennies par rapport aux rythmes qui se sont produits avant l'influence humaine sur le climat. Les données provenant des anneaux de croissance des arbres et d'autres enregistrements paléoclimatiques montrent que le rythme d'augmentation de la température de surface du globe observé au cours des cinquante dernières années a dépassé celui de toutes les précédentes périodes de 50 ans au cours des 2 000 dernières années (voir FAQ 2.1).

L'ensemble de ces éléments probants démontre que les humains sont la principale cause du réchauffement climatique observé au cours des dernières décennies.

FAQ 3.1 (suite)

FAQ 3.1: Comment savons-nous que les humains sont responsables du changement climatique?

Le réchauffement observé (1850-2019) n'est reproduit que dans les simulations qui tiennent compte de l'influence humaine.



FAQ 3.1, figure 1 | Le réchauffement observé (1850-2019) n'est reproduit que dans les simulations prenant en compte l'influence humaine.

Changements de la température de surface du globe dans les observations, par rapport aux simulations des modèles climatiques en réponse à tous les forçages humains et naturels (bande grise), aux gaz à effet de serre seulement (bande rouge), aux aérosols et aux autres facteurs humains seulement (bande bleue) et aux forçages naturels seulement (bande verte). Les lignes pleines colorées indiquent la moyenne multimodèle, et les bandes colorées indiquent la fourchette de 5 à 95 % des simulations individuelles.

FAQ 3.2 | Qu'est-ce que la variabilité naturelle et comment a-t-elle influencé les changements climatiques récents ?

La variabilité naturelle renvoie aux variations du climat qui ont pour cause des processus autres que l'influence humaine. Elle recouvre la variabilité résultant de facteurs internes au système climatique et la variabilité induite par des facteurs externes naturels. La variabilité naturelle est une cause majeure des changements d'une année sur l'autre dans le climat de surface global et peut jouer un rôle important dans les tendances sur plusieurs années, voire quelques décennies. Mais l'influence de la variabilité naturelle est généralement faible lorsque l'on considère les tendances sur des périodes de plusieurs décennies ou davantage. Estimée sur l'ensemble de la période historique (1850-2020), la contribution de la variabilité naturelle au réchauffement de surface global, comprise entre $-0,23$ °C et $+0,23$ °C, est faible par rapport au réchauffement d'environ $1,1$ °C observé au cours de la même période, que l'on a attribué quasi entièrement à l'influence humaine.

Tous les enregistrements paléoclimatiques (mesures indirectes du climat qui peuvent remonter à des milliers d'années dans le temps) et tous les modèles climatiques montrent que la température de surface globale a changé de manière significative sur une large gamme d'échelles de temps par le passé. L'une des raisons de ce changement est la variabilité naturelle, qui renvoie aux variations du climat produites soit par des facteurs internes au système climatique, soit par des facteurs externes induits par des changements naturels. La variabilité naturelle interne correspond à une redistribution d'énergie au sein du système climatique (sous l'effet par exemple de changements dans la circulation atmosphérique analogues à ceux qui déterminent le temps qu'il fait chaque jour) et s'observe plus nettement sous la forme de fluctuations régionales, plutôt que planétaires, de la température en surface. La variabilité naturelle externe peut résulter de changements dans l'orbite de la Terre, de faibles variations de l'énergie reçue du Soleil ou d'éruptions volcaniques majeures. Bien que les changements orbitaux importants soient directement en jeu pour les changements climatiques planétaires passés, ces phénomènes opèrent sur des échelles de temps très longues (c'est-à-dire des milliers d'années). De ce fait, ils n'ont que très peu changé au cours du siècle dernier et n'ont eu qu'une influence très faible sur les changements de température observés au cours de cette période. À l'inverse, les éruptions volcaniques peuvent refroidir fortement la Terre, mais cet effet est de courte durée et son influence sur la température de surface se dissipe généralement dans la décennie qui suit l'éruption.

Pour comprendre dans quelle mesure le changement climatique récent observé s'explique par la variabilité naturelle (processus appelé « attribution »), les scientifiques ont recours à des simulations du climat. Lorsque seuls les facteurs naturels sont utilisés pour forcer les modèles climatiques, les simulations qui en résultent montrent des variations du climat sur un large éventail d'échelles de temps en réaction aux éruptions volcaniques, aux variations de l'activité solaire et du fait de la variabilité naturelle interne. Toutefois, l'influence de la variabilité naturelle du climat diminue généralement à mesure que la période considérée s'allonge, de sorte qu'elle n'a que de faibles effets sur les tendances pluridécennales et à plus long terme (FAQ 3.2, figure 1).

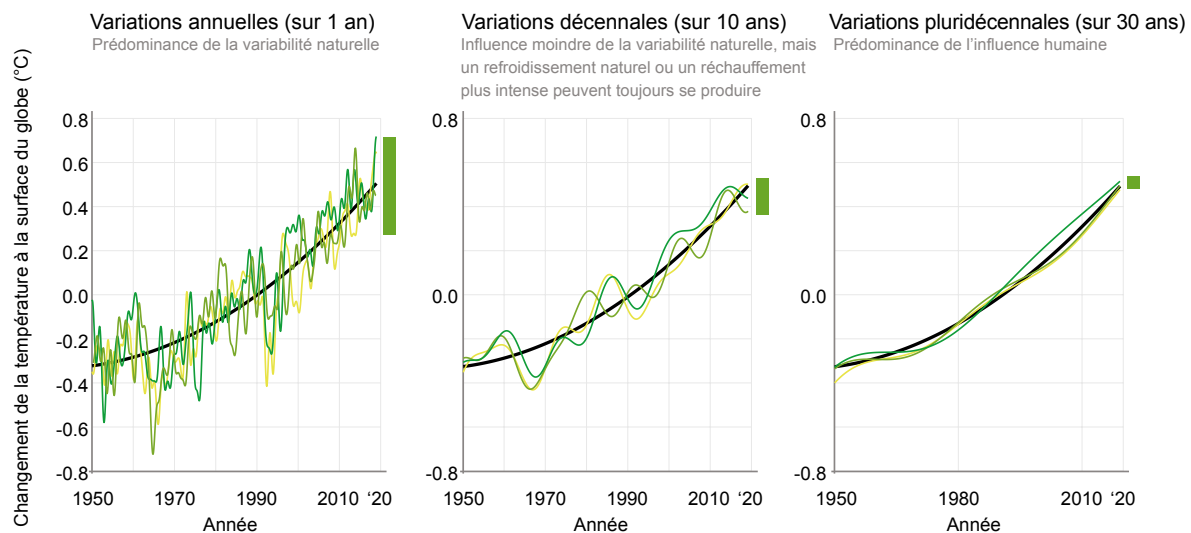
En conséquence, sur des périodes d'une durée de 20 ans ou moins, la variabilité naturelle du climat peut dominer la tendance au réchauffement de surface provoquée par les activités humaines – ce qui aboutit à des périodes de réchauffement plus marquées ou plus faibles, et parfois même de refroidissement (FAQ 3.2, figure 1, à gauche et au centre). Sur des périodes plus longues, toutefois, l'effet de la variabilité naturelle est relativement faible (FAQ 3.2, figure 1, à droite). Ainsi, sur l'ensemble de la période historique (1850-2019), on estime que la variabilité naturelle a causé entre $-0,23$ °C et $+0,23$ °C du réchauffement en surface observé qui atteint environ $1,1$ °C. Cela signifie que l'essentiel du réchauffement a été attribué quasi entièrement aux activités humaines, notamment aux émissions de gaz à effet de serre (FAQ 3.1).

Une autre façon de se représenter la variabilité naturelle et l'influence humaine consiste à penser à une personne qui promène son chien. La trajectoire du promeneur représente le réchauffement dû à l'activité humaine, tandis que celle de son chien représente la variabilité naturelle. Observer les changements de la température de surface du globe sur des périodes courtes revient à concentrer son attention sur le chien. Celui-ci passe tantôt devant son maître et tantôt derrière lui. De même, la variabilité naturelle peut affaiblir ou amplifier le réchauffement à court terme. Dans un cas comme dans l'autre, il est difficile de prévoir où le chien se trouvera ou comment le climat évoluera dans un futur proche. Néanmoins, si l'on prend du recul et que l'on concentre son attention sur les pas lents et réguliers du maître, la trajectoire du chien est beaucoup plus claire et plus prévisible, car elle suit le parcours du maître. De la même manière, l'influence humaine sur le climat est beaucoup plus claire sur des périodes longues.

FAQ 3.2 (suite)

FAQ 3.2 Qu'est-ce que la variabilité naturelle et comment a-t-elle influencé les changements climatiques récents?

La variabilité naturelle peut modifier la température du globe à des échelles de temps courtes (un an à deux décennies), mais son influence est minime à des échelles de temps plus longues. Depuis 1850, la **variabilité naturelle** (🌿📊) a provoqué un changement compris entre -0,23 °C et 0,23 °C de la température du globe, tandis que le réchauffement **observé** (📈) pour cette période est d'environ 1,1°C.



FAQ 3.2, Figure 1 | Variations annuelles (à gauche), décennales (au milieu) et multidécennales (à droite) de la température moyenne de surface du globe. La ligne noire épaisse représente l'estimation de la contribution de l'activité humaine aux changements de température, issue des modèles climatiques, tandis que les lignes vertes indiquent l'effet conjugué des variations naturelles et du réchauffement dû à l'activité humaine, les différentes nuances de vert représentant diverses simulations que l'on peut percevoir comme illustrant un éventail de passés potentiels. L'influence de la variabilité naturelle, qui est représentée par les barres vertes, diminue aux échelles de temps longues. Les données proviennent du grand ensemble CESM1.

FAQ

FAQ 3.3 | Les modèles climatiques s'améliorent-ils ?

Oui, les modèles climatiques se sont améliorés et progressent encore, devenant plus aptes à saisir les processus complexes et de petite échelle et à simuler les conditions climatiques moyennes actuelles. Cette amélioration peut être mesurée en comparant les simulations climatiques aux observations historiques. Aussi bien les modèles actuels que ceux des générations précédentes montrent que l'augmentation des gaz à effet de serre entraîne le réchauffement planétaire. Si le réchauffement passé est bien simulé par les modèles de nouvelle génération dans leur ensemble, certains modèles simulent individuellement un réchauffement passé qui est inférieur ou supérieur à celui observé. L'information sur la façon dont les modèles simulent le réchauffement passé, ainsi que d'autres connaissances issues des observations et de la compréhension théorique, sont utilisées pour affiner les projections de ce rapport concernant le réchauffement planétaire.

Les modèles climatiques sont des outils importants pour comprendre le changement climatique passé, présent et futur. Il s'agit de programmes informatiques sophistiqués qui reposent sur les lois fondamentales de la physique de l'atmosphère, de l'océan, de la glace et des terres émergées. Les modèles climatiques effectuent leurs calculs sur une grille tridimensionnelle composée de petites briques ou « mailles » d'environ 100 km d'extension horizontale. Les processus qui surviennent à des échelles plus réduites que les mailles du modèle (comme la transformation de l'humidité des nuages en pluie) sont traités de manière simplifiée. Cette simplification est effectuée différemment selon les modèles. Certains modèles incorporent davantage de processus et de complexité que d'autres ou représentent les processus de manière plus détaillée (mailles plus réduites) que d'autres. Le climat et le changement climatique simulés varient donc selon les modèles.

La modélisation du climat a débuté dans les années 1950 et, au fil du temps, les modèles ont gagné en sophistication à mesure que la puissance de calcul, les observations et la compréhension du système climatique ont progressé. Les modèles utilisés dans le premier rapport d'évaluation du GIEC, publié en 1990, reproduisaient correctement de nombreux aspects du climat (FAQ 1.1). L'évolution réelle du climat depuis lors a confirmé ces projections initiales, si l'on tient compte des différences entre les scénarios simulés et les émissions réelles. Les modèles continuent de progresser et parviennent de mieux en mieux à simuler la grande variété de processus importants qui influent sur le climat. Ainsi, de nombreux modèles simulent désormais les interactions complexes des différents aspects du système Terre, comme l'absorption du dioxyde de carbone par la végétation terrestre et par l'océan, ainsi que l'interaction des nuages et des polluants atmosphériques. Alors que certains modèles deviennent plus complets, d'autres s'attachent à représenter les processus à plus haute résolution, par exemple pour mieux représenter les tourbillons et la turbulence des courants marins responsables d'une grande partie du transport de la chaleur dans l'océan.

Les scientifiques évaluent la performance des modèles climatiques en comparant les simulations de ces modèles et les observations historiques. L'évaluation consiste à comparer des moyennes à grande échelle de même que des variations régionales et saisonnières plus détaillées. Il y a deux aspects importants à considérer : i) les résultats individuels des modèles et ii) leurs résultats de groupe. La moyenne de nombreux modèles donne souvent de meilleurs résultats par rapport aux observations que n'importe quel modèle individuel, car les erreurs associées à la représentation de processus détaillés ont tendance à se neutraliser mutuellement dans les moyennes multimodèles.

À titre d'exemple, la figure 1 de la FAQ 3.3 compare des simulations issues des trois générations les plus récentes de modèles (disponibles vers 2008, 2013 et 2021) avec les observations de trois variables climatiques. Elle montre la corrélation entre les structures simulées et observées, où une valeur de 1 représente une concordance parfaite. De nombreux modèles individuels de la nouvelle génération sont nettement plus performants, comme en témoignent des valeurs plus proches de 1. Dans l'ensemble, chaque génération s'avère plus performante que la précédente : la moyenne multimodèle (représentée par les lignes les plus longues) est progressivement plus proche de 1. L'étendue verticale des barres colorées indique la fourchette de résultats des modèles pour chaque groupe. La partie haute de la barre s'élève à chaque génération, ce qui indique une amélioration des résultats des modèles les plus performants d'une génération sur l'autre. Dans le cas des précipitations, les résultats des modèles les moins performants sont analogues pour les deux générations de modèles les plus récentes, ce qui augmente la dispersion entre les modèles.

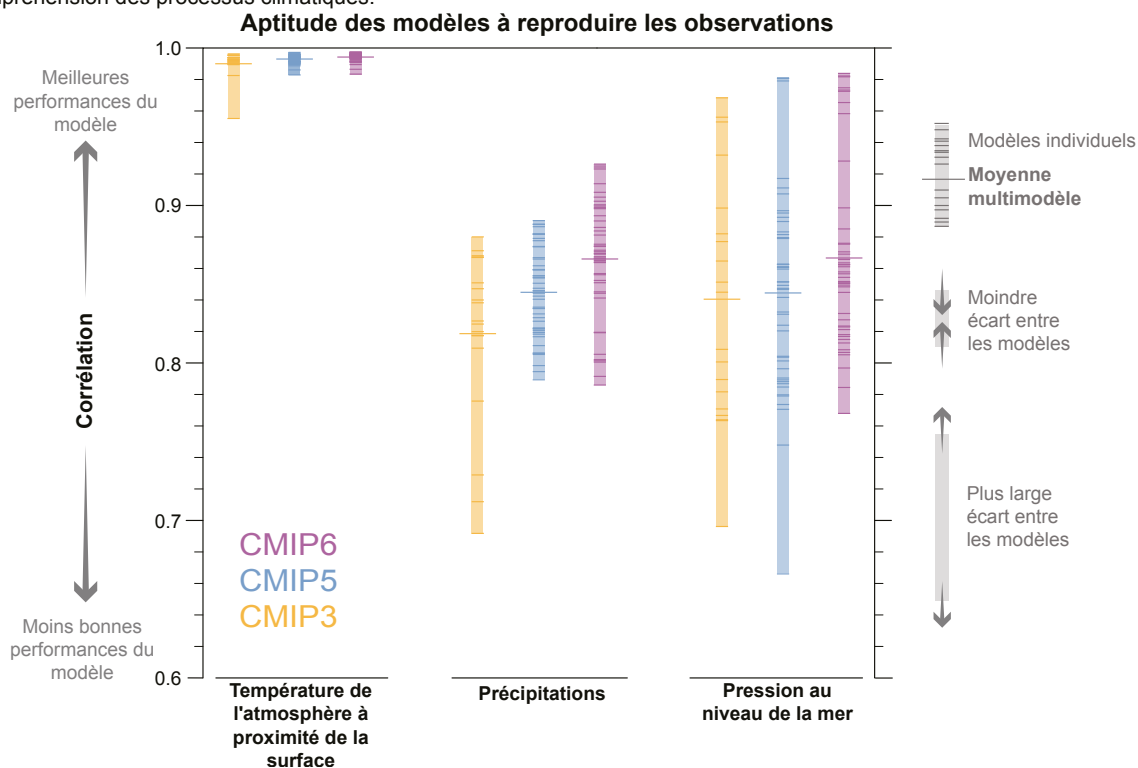
Les développements pour la dernière génération de modèles climatiques, parmi lesquels une nouvelle et meilleure représentation des processus physiques, chimiques et biologiques ainsi qu'une résolution plus élevée, ont amélioré

FAQ 3.3 (suite)

la simulation de nombreux aspects du système Terre. Ces simulations, conjuguées à l'évaluation de la capacité des modèles à simuler le réchauffement passé ainsi qu'à l'évaluation actualisée de la réponse de la température à un doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, sont utilisées pour estimer l'ampleur du réchauffement planétaire futur (FAQ 7.3).

FAQ 3.3: Les modèles climatiques s'améliorent-ils ?

Oui, les modèles climatiques ont été améliorés grâce à l'augmentation de la puissance de calcul et à l'amélioration de la compréhension des processus climatiques.



FAQ 3.3, figure 1 | Corrélations spatiales entre les modèles et les observations pour trois variables différentes : température de l'air en surface, précipitations et pression au niveau de la mer. Les résultats sont présentés pour les trois générations les plus récentes de modèles issues du Projet de comparaison de modèles couplés (CMIP) : CMIP3 (en orange), CMIP5 (en bleu) et CMIP6 (en violet). Les résultats individuels des modèles sont représentés par des lignes courtes, parallèlement à la moyenne correspondante de l'ensemble (ligne longue). Pour les corrélations, les moyennes annuelles des modèles sont comparées aux observations de référence pour la période 1980-1999, la valeur 1 représentant un accord parfait entre les modèles et les observations. Les simulations CMIP3, effectuées en 2004-2008, ont été évaluées dans le quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, les simulations CMIP5, effectuées en 2011-2013 ont été évaluées dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC et les simulations CMIP6, effectuées en 2018-2021, sont évaluées dans le présent rapport.

FAQ 4.1 | Comment le climat va-t-il changer au cours des vingt prochaines années ?

Les parties du système climatique pour lesquelles des tendances évidentes à la hausse ou à la baisse ont été établies au cours des dernières décennies verront ces tendances se poursuivre pendant au moins les vingt prochaines années. Il s'agit par exemple de l'évolution de la température de surface du globe, de l'extension de la glace de mer de l'Arctique et du niveau moyen de la mer à l'échelle du globe. Toutefois, sur une période aussi courte que vingt ans, ces tendances sont considérablement influencées par la variabilité naturelle du climat, qui peut soit amplifier, soit réduire la tendance attendue de la poursuite de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.

Une durée de vingt ans peut sembler longue à l'échelle d'une vie humaine, mais reste courte à l'échelle du climat. Les émissions de gaz à effet de serre vont se poursuivre au cours des vingt prochaines années, comme le prévoient tous les scénarios examinés dans ce rapport, mais à des rythmes différents. Ces émissions augmenteront encore les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (voir FAQ 4.2), entraînant la poursuite des tendances concernant le réchauffement à la surface du globe et d'autres aspects du système climatique, comme la glace de mer de l'Arctique et le niveau moyen global de la mer (voir FAQ 9.2). La figure 1 de la FAQ 4.1 montre que l'augmentation de la température à la surface du globe et le rétrécissement de la glace de mer de l'Arctique se poursuivront au cours des vingt prochaines années, avec peu de différence entre les scénarios à fortes et à faibles émissions (soit entre les lignes rouge et bleue).

Cependant, à ces tendances attendues viendra se superposer la variabilité naturelle du climat (voir FAQ 3.2). En premier lieu, une éruption volcanique majeure peut se produire, comme l'éruption du Mont Pinatubo aux Philippines en 1991 ; une telle éruption pourrait provoquer un refroidissement de la surface de la planète de quelques dixièmes de degré Celsius pendant plusieurs années. En deuxième lieu, l'atmosphère et l'océan présentent des variations qui se produisent spontanément, sans aucune influence extérieure. Ces variations vont de systèmes météorologiques localisés à des structures et oscillations à l'échelle de continents et d'océans qui évoluent sur plusieurs mois, années ou décennies. Sur une période de vingt ans, la variabilité naturelle du climat influence fortement de nombreuses grandeurs climatiques par rapport à leur réponse à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre due aux activités humaines. L'effet de la variabilité naturelle est illustré par les trajectoires très différentes que peuvent emprunter les lignes noires, rouges ou bleues individuelles dans la figure 1 de la FAQ 4.1. Il est généralement impossible de prévoir si la variabilité naturelle amplifiera ou réduira l'influence humaine dans les vingt prochaines années. La variabilité naturelle du climat au cours des prochaines années constitue donc une incertitude qui, au mieux, peut être quantifiée avec précision, mais qui ne peut être réduite.

Localement, l'effet de la variabilité naturelle serait bien plus important encore. Les simulations (non représentées ici) indiquent que, localement, une tendance au refroidissement au cours des vingt prochaines années ne peut être exclue, même dans le cas du scénario à fortes émissions, dans un petit nombre d'endroits qui peuvent se trouver n'importe où sur Terre. À l'échelle planétaire, cependant, la température augmenterait dans tous les scénarios.

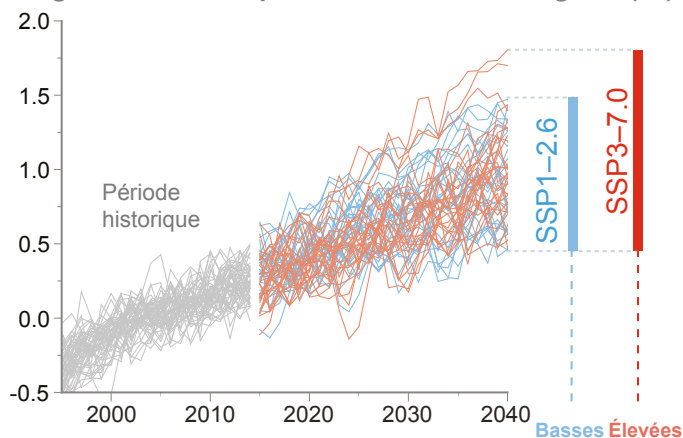
En bref, si la direction du changement futur est claire pour les deux grandeurs climatiques importantes présentées ici (la température à la surface du globe et l'étendue de glace de mer de l'Arctique en septembre), l'ampleur du changement est beaucoup moins claire en raison de la variabilité naturelle.

FAQ 4.1 (suite)

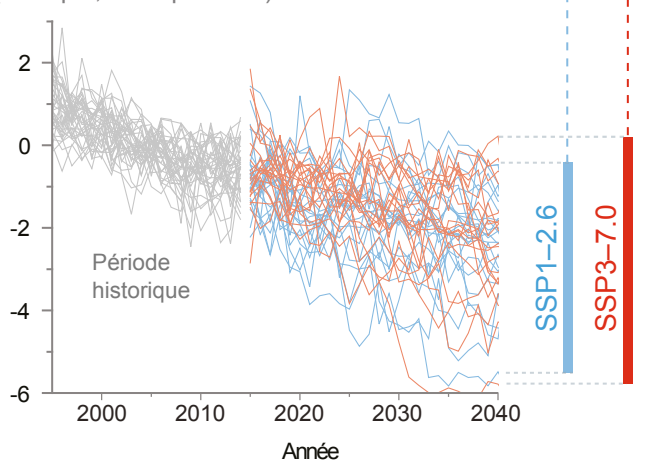
FAQ 4.1: Comment le climat va-t-il changer au cours des vingt prochaines années ?

Les tendances actuelles du climat vont se poursuivre au cours des prochaines décennies, mais il n'est pas possible d'en prédire l'ampleur exacte en raison de la variabilité naturelle.

Changement de la température à la surface du globe (°C)



Changement de la zone de glace de mer (en millions de km²) (Arctique, en septembre)



FAQ 4.1, figure 1 | Simulation, sur la période 1995-2040, portant sur le passé récent et les vingt prochaines années, de deux indicateurs importants du changement climatique planétaire. (En haut) Température à la surface du globe et (en bas) étendue de glace de mer de l'Arctique en septembre. Les deux grandeurs sont représentées par l'écart par rapport à la moyenne sur la période 1995-2014. Les courbes grises correspondent à la période historique s'achevant en 2014 ; les courbes bleues représentent un scénario de faibles émissions (SSP1 2.6) et les courbes rouges un scénario de fortes émissions (SSP3 7.0).

FAQ

FAQ 4.2 | Au bout de combien de temps verrions-nous les effets d'une réduction des émissions de dioxyde de carbone ?

Les effets d'une réduction substantielle des émissions de dioxyde de carbone ne seraient pas visibles immédiatement, et le temps nécessaire pour les détecter serait fonction de l'ampleur et du rythme de la réduction. Dans les scénarios des émissions les plus basses étudiés dans ce rapport, l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ralentirait de manière visible après environ cinq à dix ans, tandis que le ralentissement du réchauffement à la surface du globe serait détectable après environ vingt à trente ans. Les effets sur les tendances des précipitations régionales ne seraient visibles qu'après plusieurs décennies.

La réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), le plus important des gaz à effet de serre émis par les activités humaines, ralentirait le rythme de l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Toutefois, la concentration ne commencerait à diminuer que lorsque les émissions nettes seraient proches de zéro, autrement dit lorsque la plupart ou la totalité du CO₂ émis chaque année dans l'atmosphère est éliminé par des processus naturels et humains (voir FAQ 5.1 et 5.3). Ce délai entre un pic des émissions et une diminution de la concentration traduit la très longue durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère ; une partie du CO₂ émis par les activités humaines demeure dans l'atmosphère pendant des siècles à des millénaires.

Diminuer le rythme d'augmentation de la concentration de CO₂ ralentirait le réchauffement à la surface du globe en l'espace d'une décennie. Mais cette réduction du taux de réchauffement serait masquée dans un premier temps par la variabilité naturelle du climat et pourrait ne pas être détectée avant quelques décennies (voir FAQ 1.2, 3.2 et 4.1). Il serait donc difficile de détecter si le réchauffement en surface a effectivement ralenti dans les années qui suivent le début de la réduction des émissions.

Le temps nécessaire pour détecter l'effet des réductions d'émissions est illustré en comparant les scénarios d'émissions basses et élevées (FAQ 4.2, figure 1). Dans le scénario d'émissions basses (SSP1 2.6), les émissions de CO₂ se stabilisent après 2015 et commencent à diminuer en 2020, tandis qu'elles continuent d'augmenter pendant tout le XXI^e siècle dans le scénario d'émissions élevées (SSP3 7.0). L'incertitude liée au rôle de la variabilité naturelle interne du système climatique est représentée en simulant chaque scénario à dix reprises à l'aide du même modèle climatique, mais en partant d'états initiaux légèrement différents en 1850 (lignes fines). Pour chaque scénario, les différences entre les diverses simulations s'expliquent entièrement par la variabilité naturelle interne simulée. La moyenne de toutes les simulations représente la réponse climatique attendue pour un scénario donné. L'histoire climatique qui se produirait réellement dans le cas de chaque scénario serait constituée de cette réponse attendue, conjuguée à la contribution de la variabilité naturelle interne et à la contribution des éruptions volcaniques futures potentielles (ce dernier effet n'est pas représenté ici).

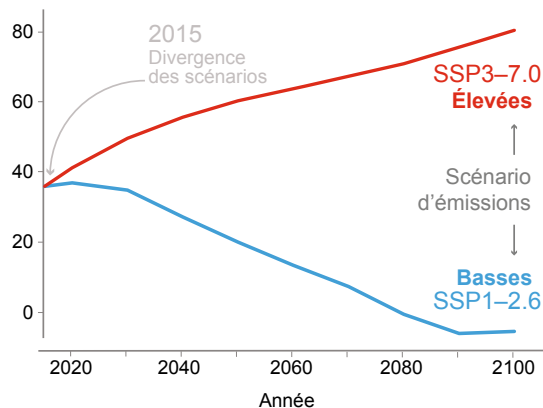
La figure 1 de la FAQ 4.2 montre que les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère diffèrent sensiblement entre les deux scénarios environ cinq à dix ans après que les émissions ont commencé de diverger en 2015. En revanche, la différence entre les deux scénarios pour la température à la surface du globe n'apparaît que plus tard, environ deux à trois décennies après le début de la divergence de l'historique des émissions dans l'exemple considéré. Ce délai serait plus long si les émissions étaient réduites plus lentement que dans le scénario d'émissions basses illustré ici et plus court si les réductions étaient plus fortes. La détection prendrait plus de temps pour les grandeurs régionales et pour les changements de précipitations, qui sont plus fortement affectés par les causes naturelles. Ainsi, même dans le scénario d'émissions basses, l'effet de la réduction des émissions de CO₂ ne serait pas visible dans les précipitations régionales avant la fin du XXI^e siècle.

En bref, ce n'est qu'après quelques décennies de réduction des émissions de CO₂ que nous verrions clairement la température à la surface du globe commencer à se stabiliser. En revanche, de brèves réductions des émissions de CO₂, comme pendant la pandémie de COVID-19, n'ont pas d'effets détectables sur la concentration de CO₂ ou la température du globe. Seules des réductions soutenues des émissions sur plusieurs décennies produiraient un large effet sur le système climatique.

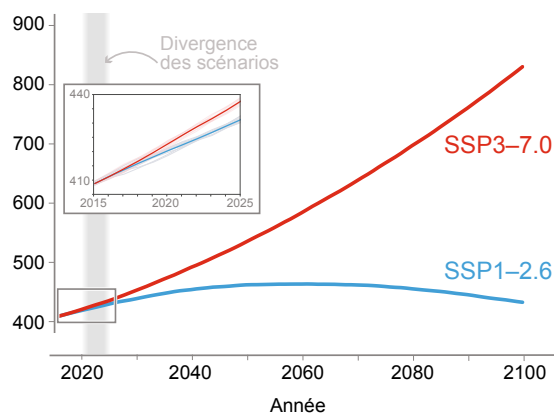
FAQ 4.2: Détecter les effets d'une réduction des émissions de CO₂

Une réduction soutenue des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) serait visible dans la concentration atmosphérique après 5 à 10 ans et dans les températures après 20 à 30 ans.

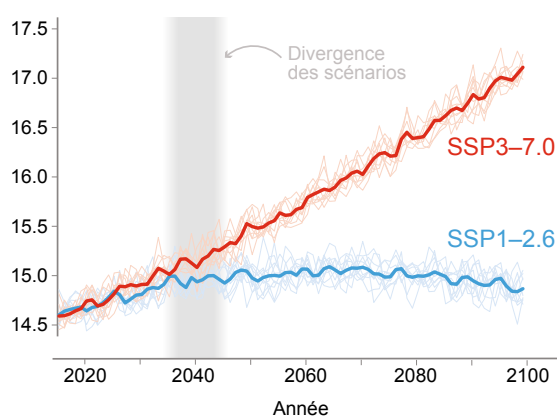
Émissions de CO₂ (en milliards de tonnes de CO₂ par an)



Concentrations de CO₂ dans l'atmosphère (ppm)



Température à la surface du globe (°C)



FAQ 4.2, figure 1 | Observer les bénéfices de la réduction des émissions. (En haut) Émissions de dioxyde de carbone (CO₂), (au milieu) concentration de CO₂ dans l'atmosphère et (en bas) effet sur la température globale en surface pour deux scénarios : un scénario d'émissions basses (SSP1 2.6, en bleu) et un scénario d'émissions élevées (SSP3 7.0). Dans le scénario d'émissions basses, les émissions de CO₂ commencent à diminuer en 2020, tandis qu'elles continuent à augmenter pendant tout le XXI^e siècle dans le scénario d'émissions élevées. Les lignes épaisses représentent la moyenne de chacune des 10 simulations (ligne fine) pour chaque scénario. Les différences entre les diverses simulations correspondent à la variabilité naturelle.

FAQ 4.3 | Pour un niveau donné de réchauffement planétaire, quelles sont les structures spatiales du changement climatique ?

A mesure que la planète se réchauffe, le changement climatique ne se déroule pas de manière uniforme sur toute la planète, mais certaines structures de changements régionaux sont clairement, directement et étroitement reliées à l'augmentation de la température à la surface du globe. L'Arctique se réchauffe davantage que les autres régions, les terres émergées davantage que la surface de l'océan et l'hémisphère Nord davantage que l'hémisphère Sud. Les précipitations augmentent aux latitudes élevées, dans les tropiques et dans une grande partie des régions de mousson, mais diminuent dans les régions subtropicales. Pour ce type de cas, nous pouvons établir la direction et l'ampleur de certains changements régionaux – en particulier les changements de température et de précipitations – pour tout niveau donné de réchauffement planétaire.

L'intensité du changement climatique va dépendre du niveau de réchauffement planétaire. Il est possible d'identifier certaines structures de changements climatiques régionaux qui se produisent de manière cohérente, mais dont l'amplitude s'accroît lorsque le niveau de réchauffement planétaire augmente. Ces structures spatiales robustes du changement climatique sont largement indépendantes du scénario spécifique (et de la trajectoire temporelle) qui aboutit à un niveau donné de réchauffement planétaire. Autrement dit, lorsque différents scénarios aboutissent au même niveau de réchauffement planétaire, quel que soit le moment auquel ce niveau est atteint dans chaque scénario, nous pouvons déterminer les structures des changements régionaux qui résulteraient de ce réchauffement. Lorsque ces structures de changements sont robustes, les conséquences régionales peuvent être évaluées pour tous les niveaux de réchauffement planétaire, pour toutes les périodes futures et pour tous les scénarios. Les changements de température et de précipitations présentent de telles structures robustes qui sont particulièrement frappantes.

Les hautes latitudes de l'hémisphère Nord devraient connaître le plus fort réchauffement, de deux à quatre fois supérieur au niveau du réchauffement planétaire – un phénomène appelé amplification arctique (FAQ 4.3, figure 1, à gauche). Plusieurs processus contribuent à ce taux élevé de réchauffement, notamment l'augmentation de l'absorption du rayonnement solaire du fait de la perte de la glace de mer et de la neige et de leurs propriétés réfléchissantes dans un monde plus chaud. Dans l'hémisphère Sud, l'Antarctique devrait se réchauffer plus rapidement que l'océan Austral des latitudes moyennes, mais les hautes latitudes de l'hémisphère Sud devraient se réchauffer à une amplitude réduite par rapport au niveau du réchauffement planétaire (FAQ 4.3, figure 1, à gauche). Ce réchauffement relativement plus lent des hautes latitudes de l'hémisphère Sud s'explique en grande partie par la remontée des eaux profondes de l'Antarctique qui permet une importante absorption de chaleur à la surface de l'océan Austral.

Le réchauffement est généralement plus prononcé au-dessus des terres émergées que de l'océan, et dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud, tout en étant moins marqué dans la région subpolaire centrale de l'Atlantique nord et dans la partie la plus méridionale du Pacifique. Ces différences tiennent à plusieurs facteurs, notamment les différences dans la façon dont les zones terrestres et océaniques absorbent et retiennent la chaleur, le fait que l'hémisphère Nord comporte davantage de terres émergées que l'hémisphère Sud et l'influence de la circulation océanique. Pour l'hémisphère Sud, des structures robustes de réchauffement assez marqué sont projetées pour les régions subtropicales de l'Amérique du Sud, de l'Afrique australe et de l'Australie. Le réchauffement relativement important de la région subtropicale de l'Afrique australe résulte de fortes interactions de l'humidité du sol et de la température, ainsi que de l'augmentation du rayonnement solaire du fait d'une subsidence accrue.

Les changements de précipitations sont proportionnels eux aussi au niveau de réchauffement planétaire (FAQ 4.3, figure 1, à droite), même si les incertitudes sont plus élevées que pour le changement de température. Aux hautes latitudes de l'hémisphère Sud et de l'hémisphère Nord, des augmentations de précipitations sont attendues à mesure que la planète continuera de se réchauffer, les changements devant être d'autant plus importants que les niveaux de réchauffement planétaire seront élevés (FAQ 4.3, figure 1, à droite). Il en va de même pour les projections d'augmentation des précipitations dans les tropiques et dans une grande partie des régions de mousson. Un assèchement général est attendu dans les régions subtropicales, particulièrement en Méditerranée, en Afrique australe et dans certaines parties de l'Australie, de l'Amérique du Sud et du sud-ouest de l'Amérique du Nord, ainsi que dans la région subtropicale de l'Atlantique et une partie des régions subtropicales de l'océan Indien et de l'océan Pacifique. Cette augmentation des précipitations dans les régions tropicales et leur diminution dans les régions subtropicales s'amplifient avec l'augmentation du niveau de réchauffement planétaire.

FAQ 4.3 (suite)

Certaines régions déjà sèches et chaudes, comme l'Afrique australe et la Méditerranée, devraient devenir progressivement plus sèches et radicalement plus chaudes avec l'augmentation du niveau de réchauffement planétaire.

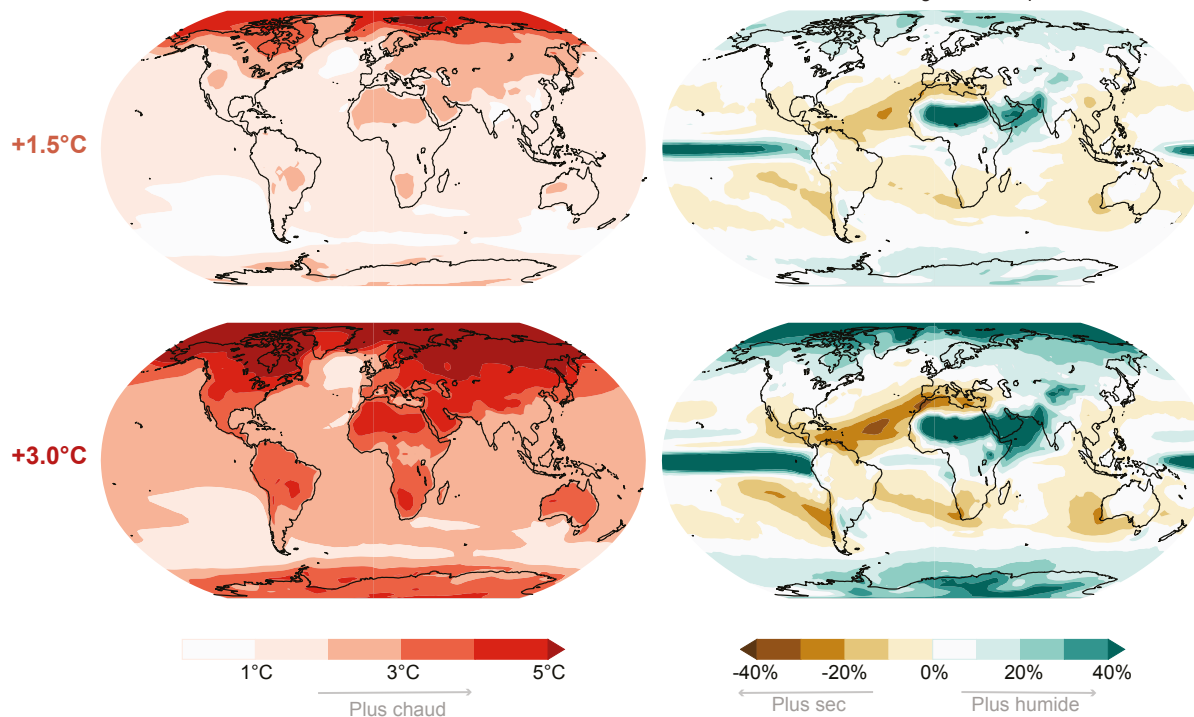
En résumé, le changement climatique ne touchera pas toutes les parties du globe uniformément. On identifie plutôt des structures régionales distinctes de changements de la température et des précipitations, et il est projeté que ces changements s'amplifieront à mesure que le niveau de réchauffement planétaire augmentera.

FAQ 4.3: Structures régionales du changement climatique

Le changement climatique n'est pas uniforme et ses caractéristiques régionales s'intensifient en relation avec le niveau de réchauffement planétaire

Le réchauffement sera plus prononcé en Arctique, sur les terres émergées et dans l'hémisphère Nord.

Les précipitations augmenteront aux hautes latitudes et dans les régions tropicales et les régions de mousson et diminueront dans les régions subtropicales.



FAQ 4.3, figure 1 | Les changements régionaux de température (à gauche) et de précipitations (à droite) sont proportionnels au niveau de réchauffement planétaire, quel que soit le scénario par lequel ce niveau de réchauffement planétaire est atteint. Le réchauffement en surface et le changement des précipitations sont indiqués par rapport au climat de 1850-1900, et pour des périodes au cours desquelles le réchauffement de la planète en surface est de 1,5 °C (en haut) et de 3 °C (en bas), respectivement. Les changements présentés ici sont issus de 31 modèles CMIP6 utilisant le scénario d'émissions SSP3 7.0.

FAQ

FAQ 5.1 | L'élimination naturelle du carbone de l'atmosphère s'affaiblit-elle ?

Pendant des décennies, la moitié environ du dioxyde de carbone (CO₂) que les activités humaines ont émis dans l'atmosphère a été absorbée par les puits de carbone naturels de la végétation, des sols et des océans. Ces puits naturels de CO₂ ont donc ralenti environ de moitié le rythme auquel les concentrations de CO₂ ont augmenté dans l'atmosphère, et ont donc ralenti le réchauffement planétaire. Les observations indiquent cependant que les processus qui sous-tendent cette absorption commencent à réagir à l'accroissement du CO₂ dans l'atmosphère et au changement climatique d'une manière qui affaiblira la capacité de la nature à absorber le CO₂ à l'avenir. Il est essentiel de comprendre l'ampleur de ce changement pour prévoir comment le système climatique réagira aux émissions futures et aux mesures de réduction des émissions.

Les observations directes des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, qui ont commencé en 1958, montrent que l'atmosphère n'a conservé que la moitié environ du CO₂ émis par les activités humaines, en raison de la combustion de combustibles fossiles et de changements d'affectation des terres comme la déforestation (FAQ 5.1, figure 1). Les processus naturels du cycle du carbone sur les terres émergées et dans l'océan ont absorbé le reste de ces émissions. Ces « puits » de carbone terrestres et océaniques ont augmenté d'une façon largement proportionnelle à l'augmentation des émissions de CO₂, absorbant respectivement 31 % (terres émergées) et 23 % (océan) des émissions sur la période 2010-2019 (FAQ 5.1, figure 1). De ce fait, la proportion moyenne des émissions annuelles de CO₂ qui restent dans l'atmosphère est demeurée à peu près stable, à 44 %, au cours des soixante dernières années, malgré l'augmentation continue des émissions de CO₂ provenant des activités humaines.

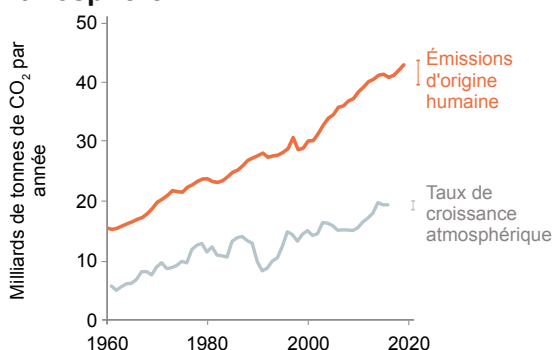
Sur les terres émergées, c'est principalement la végétation qui capte le CO₂ de l'atmosphère par la *photosynthèse*, celui-ci finissant par s'accumuler aussi bien dans la végétation que dans les sols. À mesure que davantage de CO₂ s'accumule dans l'atmosphère, le captage du carbone par les végétaux augmente en raison de *l'effet de fertilisation par le CO₂* dans les régions où la croissance des plantes n'est pas limitée par des facteurs comme la disponibilité des nutriments. Le changement climatique agit sur les processus responsables de l'absorption et de la libération du CO₂ sur les terres émergées de multiples façons. L'absorption terrestre du CO₂ est généralement accrue par des saisons de croissance plus longues en raison du réchauffement de la planète dans les régions froides et par les dépôts d'azote dans les régions où la présence d'azote est limitée. La respiration des plantes et des organismes du sol, les perturbations naturelles, comme les incendies, et les activités humaines, comme la déforestation, sont autant de processus qui renvoient du CO₂ dans l'atmosphère. L'effet cumulé du changement climatique sur ces processus est d'affaiblir les puits terrestres futurs. En particulier, les températures extrêmes et les sécheresses ainsi que le dégel du pergélisol (voir FAQ 5.2) ont tendance à réduire le puits terrestre à l'échelle régionale. Dans l'océan, plusieurs facteurs déterminent la quantité de CO₂ qui est captée : la différence de pression partielle du CO₂ entre l'atmosphère et l'océan en surface ; la vitesse des vents à la surface de l'océan ; la composition chimique de l'eau de mer (autrement dit son *pouvoir tampon*), qui influe sur la quantité de CO₂ pouvant être absorbée ; et l'utilisation du CO₂ pour la photosynthèse par les microalgues d'eau de mer. Les eaux océaniques de surface enrichies en CO₂ sont transportées vers les profondeurs de l'océan dans certaines zones du globe (comme la région septentrionale de l'Atlantique et l'océan Austral), le CO₂ étant ainsi stocké efficacement loin de l'atmosphère pendant plusieurs décennies à plusieurs siècles. L'effet cumulé du réchauffement de la température de surface de l'océan sur ces processus est d'affaiblir le puits de CO₂ océanique futur.

FAQ 5.1 (suite)

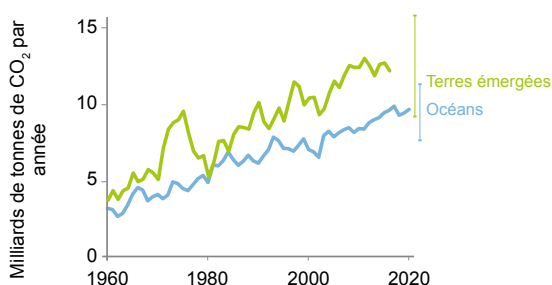
FAQ 5.1: L'élimination naturelle du carbone de l'atmosphère s'affaiblit-elle ?

Non, les puits de carbone naturels ont absorbé une fraction pratiquement constante des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) provenant des activités humaines au cours des six dernières décennies. On s'attend cependant à ce que cette fraction diminue à l'avenir si les émissions de CO₂ continuent d'augmenter.

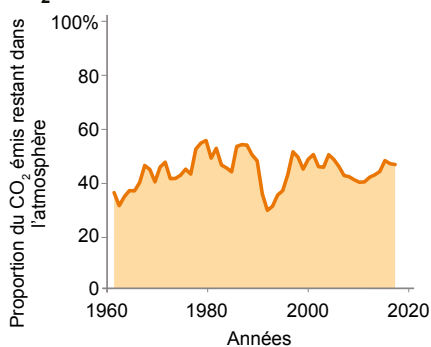
Atmosphère



Puits naturels



CO₂ restant dans l'atmosphère



Le puits de carbone océanique est mieux quantifié que le puits terrestre grâce aux observations directes du carbone océanique et atmosphérique. La surveillance du puits de carbone terrestre pose davantage de difficultés à l'échelle planétaire, celui-ci connaissant de fortes variations, même à l'échelle régionale. Il n'existe actuellement aucune preuve directe que les puits naturels ralentissent, car les changements observables dans la fraction des émissions humaines stockées sur terre ou dans les océans sont faibles par rapport aux variations annuelles et décennales de ces puits. Néanmoins, il est de plus en plus évident que les changements atmosphériques et climatiques ont une incidence sur les processus qui contrôlent les puits terrestres et océaniques.

Dans la mesure où les puits terrestres et océaniques réagissent à l'augmentation du CO₂ atmosphérique et au réchauffement climatique d'origine humaine, la quantité absolue de CO₂ absorbée par les terres émergées et l'océan sera influencée par les émissions futures de CO₂. Il s'ensuit également que si les pays parviennent à réduire fortement les émissions de CO₂ mondiales, voire à éliminer le CO₂ de l'atmosphère, ces puits absorberont moins de CO₂ du fait de la diminution des perturbations humaines du cycle du carbone. Dans les scénarios de fort réchauffement futur, on s'attend à ce que les puits océaniques et terrestres mondiaux cessent de croître dans la seconde moitié du siècle, étant de plus en plus affectés par les effets du changement climatique. Ainsi, la quantité

totale de CO₂ émise dans l'atmosphère et les réponses des puits naturels de CO₂ vont déterminer quels efforts seront nécessaires pour limiter le réchauffement planétaire à un certain niveau (voir FAQ 5.4), ce qui souligne l'importance de comprendre l'évolution de ces puits naturels de CO₂.

FAQ 5.1, figure 1 | Dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère et puits de carbone naturels. (En haut) Émissions mondiales de CO₂ provenant des activités humaines et taux d'accroissement du CO₂ dans l'atmosphère ; (au milieu) absorption nette du CO₂ par les terres émergées et les océans (puits naturels) ; et (en bas) fraction du CO₂ émis par les activités humaines qui est resté dans l'atmosphère de 1960 à 2019. Les lignes représentent la moyenne mobile sur cinq ans, et les barres d'erreur indiquent l'incertitude de l'estimation moyenne. Voir le tableau 5.SM.6 pour de plus amples renseignements sur les données utilisées pour cette figure.

FAQ

FAQ 5.2 | Le dégel du pergélisol peut-il sensiblement renforcer le réchauffement planétaire ?

Dans l'Arctique, de grandes quantités de carbone organique sont stockées dans le pergélisol – sol restant gelé toute l'année. Si d'importantes zones de pergélisol dégèlent avec le réchauffement du climat, une partie de ce carbone peut être libérée dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane, entraînant un réchauffement supplémentaire. Les projections réalisées à partir de modèles d'écosystèmes de pergélisol suggèrent que le dégel futur du pergélisol entraînera un certain réchauffement supplémentaire – suffisant pour être important, mais pas assez pour conduire à une situation d'« emballement du réchauffement », où le dégel du pergélisol entraînerait une accélération brutale et autorenforcée du réchauffement planétaire.

L'Arctique est le plus grand réservoir de carbone sensible aux effets du climat sur Terre ; ses sols gelés, ou *pergélisols*, stockent en effet deux fois plus de carbone que la quantité actuellement contenue dans l'atmosphère. Comme la région de l'Arctique se réchauffe plus rapidement que n'importe quel autre endroit sur Terre, on craint que ce réchauffement ne libère des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et n'amplifie donc considérablement le changement climatique.

Le carbone contenu dans le pergélisol s'est accumulé pendant des milliers d'années, les végétaux morts s'étant accumulés après enfouissement dans les couches de sol gelé, où le froid empêche la matière organique de se décomposer. À mesure que l'Arctique se réchauffe et que ces sols dégèlent, la matière organique qu'ils contiennent commence à se décomposer rapidement et retourne dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone ou de méthane, deux importants gaz à effet de serre. Le pergélisol peut aussi dégeler localement de manière abrupte, en raison de la fonte de la glace du sol qui remodèle les paysages de l'Arctique, de l'expansion et du drainage des lacs, et des incendies qui détruisent les couches isolantes du sol en surface. La libération de carbone consécutivement au dégel du pergélisol a déjà été observée dans l'Arctique, et les modèles climatiques prévoient qu'une grande partie du pergélisol superficiel (< 3 m de profondeur) de tout l'Arctique dégèlerait dans des conditions de réchauffement planétaire modéré à élevé (2 °C-4 °C).

Bien que les processus du pergélisol soient complexes, ils commencent à être inclus dans des modèles qui représentent les interactions entre climat et cycle du carbone. Les projections de ces modèles du carbone du pergélisol montrent une large fourchette d'intensité, pour ce cercle vicieux entre le carbone et le climat dû aussi bien au dioxyde de carbone qu'au méthane, comprise entre 14 et 175 milliards de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone libérées par degré supplémentaire de réchauffement planétaire. Par comparaison, en 2019, les activités humaines ont émis environ 40 milliards de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Cela a deux conséquences. En premier lieu, le réchauffement supplémentaire provoqué par le dégel du pergélisol est suffisamment fort pour devoir être pris en compte dans l'estimation de la quantité totale des émissions résiduelles compatibles avec la stabilisation du climat à un niveau donné de réchauffement planétaire (c'est-à-dire le budget carbone résiduel, voir FAQ 5.4). En second lieu, les modèles n'identifient pas de niveau de réchauffement particulier à partir duquel le dégel du pergélisol deviendrait un « point de bascule », c'est-à-dire un seuil dans le système climatique qui déclencherait un emballement du réchauffement de la planète. Cependant, ils projettent que ces émissions augmenteront continuellement avec le réchauffement et que cette tendance pourrait persister pendant des centaines d'années.

Le pergélisol est aussi présent dans d'autres endroits froids (comme les chaînes de montagnes), mais qui contiennent beaucoup moins de carbone que l'Arctique. Ainsi, le plateau tibétain contient une quantité équivalente à environ 3 % du carbone stocké dans l'Arctique. Le carbone gelé dans les sédiments océaniques peu profonds est aussi un sujet de préoccupation. Ces dépôts sont connus sous le nom d'*hydrates de méthane* ou *clathrates*, molécules de méthane enfermées dans une cage de molécules de glace. Ils se sont formés dans des sols gelés qui ont été inondés quand le niveau de la mer est monté après la dernière période glaciaire. Si ces hydrates dégèlent, ils peuvent libérer du méthane qui peut remonter à la surface. La quantité totale de carbone des hydrates de méthane associés au pergélisol est nettement inférieure à celle du carbone des sols du pergélisol. Le réchauffement planétaire met des millénaires à pénétrer dans les sédiments du fond de l'océan, ce qui explique pourquoi ces hydrates réagissent encore à la dernière déglaciation. Par conséquent, seule une petite fraction des hydrates existants pourrait être déstabilisée au cours du siècle à venir. Même lorsque du méthane est libéré de ces hydrates, on s'attend à ce que la majeure partie de celui-ci soit consommée et oxydée en dioxyde de carbone dans l'océan avant d'atteindre l'atmosphère. D'après la modélisation de ces processus la plus complète dont on dispose aujourd'hui, le taux de libération dans l'atmosphère serait inférieur à 2 % des émissions de méthane actuelles liées aux activités humaines.

FAQ 5.2 (suite)

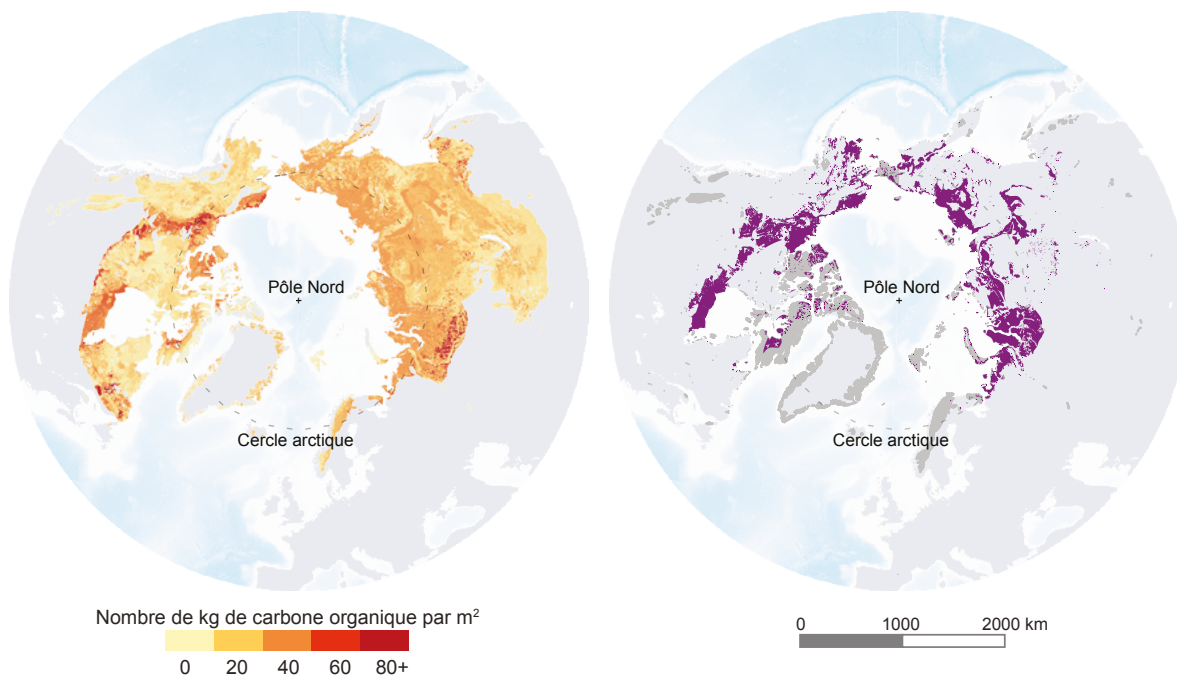
Dans l'ensemble, le dégel du pergélisol de l'Arctique semble être une source supplémentaire importante de gaz piégeant la chaleur dans l'atmosphère, davantage que les hydrates sous-marins. Les modèles du climat et du cycle du carbone commencent à prendre en compte les processus du pergélisol. Si ces modèles divergent sur la quantité exacte de gaz piégeant la chaleur qui sera libérée dans l'atmosphère, ils s'accordent sur le fait que : i) la quantité de ces gaz libérés par le pergélisol augmentera avec le niveau de réchauffement planétaire ; et ii) l'effet amplifiant du dégel du pergélisol sur le réchauffement planétaire est suffisamment important pour être pris en compte dans l'estimation des budgets carbone résiduels pour limiter le réchauffement à venir.

FAQ5.2: Le dégel du pergélisol peut-il sensiblement renforcer le réchauffement planétaire?

Le dégel des sols gelés dans l'Arctique libérera du carbone qui amplifiera le réchauffement planétaire, mais cela ne conduira pas à un réchauffement incontrôlé.

Carbone stocké dans le pergélisol de l'Arc

Pergélisol **vulnérable** à un dégel brutal



FAQ 5.2, figure 1 | Le pergélisol de l'Arctique est un grand réservoir de carbone qui est sensible au changement climatique. (À gauche) Quantité de carbone stockée dans le pergélisol, à 3 m de profondeur (jeu de données NCSCDv2) et **(à droite)** zone de pergélisol vulnérable à un dégel brutal (jeu de données Circumpolar Thermokarst Landscapes).

FAQ

FAQ 5.3 | Le changement climatique pourrait-il être inversé en éliminant du dioxyde de carbone de l'atmosphère ?

L'élimination délibérée de dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère pourrait inverser certains aspects du changement climatique (c'est-à-dire en changer le sens). Cependant, cela pourra seulement se produire s'il en résulte une réduction nette de la quantité totale de CO₂ dans l'atmosphère, autrement dit si les absorptions délibérées sont plus importantes que les émissions. Certaines tendances du changement climatique, comme l'augmentation de la température à la surface du globe, commenceraient à s'inverser en quelques années. D'autres aspects du changement climatique mettraient des décennies (comme le dégel du pergélisol) ou des siècles (comme l'acidification de l'océan profond) à s'inverser, et certains, comme l'élévation du niveau de la mer, mettraient des siècles ou des millénaires à changer de sens.

L'expression *émissions négatives de dioxyde de carbone (CO₂)* désigne l'élimination du CO₂ de l'atmosphère par des activités humaines délibérées, en sus des absorptions qui se produisent naturellement, et est souvent utilisée comme synonyme de l'expression *élimination du dioxyde de carbone*. Des émissions négatives de CO₂ peuvent compenser la libération de CO₂ dans l'atmosphère par les activités humaines. Elles pourraient être réalisées en renforçant les processus naturels de piégeage du CO₂ sur les terres émergées (par exemple en plantant des arbres ou par des pratiques agricoles qui augmentent la teneur en carbone des sols) et/ou dans l'océan (notamment par la restauration des écosystèmes côtiers) ou en éliminant directement le CO₂ de l'atmosphère. Si les absorptions de CO₂ sont supérieures aux émissions de CO₂ dues à l'homme à l'échelle mondiale, les émissions sont dites nettes négatives. On notera que les technologies d'élimination du CO₂ ne sont pas capables d'atteindre l'échelle d'absorption qui serait nécessaire pour compenser les niveaux actuels d'émissions, ou n'y sont pas encore prêtes, et que la plupart ont des effets secondaires indésirables.

En l'absence d'élimination délibérée du CO₂, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (une mesure de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère) résulte d'un équilibre entre les rejets de CO₂ par les activités humaines et l'élimination du CO₂ par des processus naturels sur les terres émergées et dans les océans (les « puits de carbone » naturels ; voir FAQ 5.1). Si la libération de CO₂ dépasse l'élimination par les puits de carbone, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente ; si la libération de CO₂ est égale à l'élimination, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère se stabilise ; et si l'élimination du CO₂ dépasse les rejets, la concentration de CO₂ diminue. Il en va de même pour les émissions nettes de CO₂, à savoir la somme des rejets dus à l'homme et des absorptions délibérées.

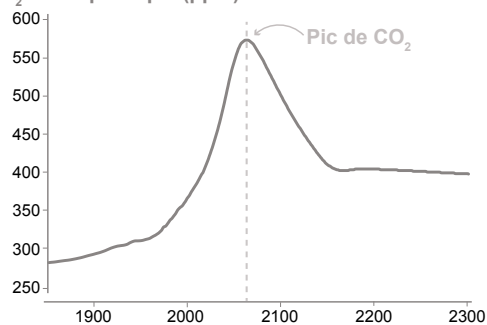
Si la concentration de CO₂ dans l'atmosphère commence à diminuer, le climat de la Terre réagira à ce changement (FAQ 5.3, figure 1). Certaines parties du système climatique mettent du temps à réagir à un changement de la concentration de CO₂, de sorte qu'une diminution du CO₂ atmosphérique à la suite d'émissions nettes négatives ne conduirait pas immédiatement à une inversion de toutes les tendances du changement climatique. Des études récentes ont montré que la température à la surface du globe commencerait à baisser en quelques années après une diminution du CO₂ atmosphérique, même si cette baisse ne serait pas détectable avant des décennies en raison de la variabilité climatique naturelle (voir FAQ 4.2). D'autres conséquences du changement climatique d'origine humaine, comme la diminution de l'étendue du pergélisol, mettraient des décennies à s'inverser ; d'autres encore, comme le réchauffement, l'acidification et l'appauvrissement en oxygène de l'océan profond, mettraient des siècles à s'inverser à la suite d'une baisse de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Le niveau de la mer continuerait de s'élever pendant des siècles ou des millénaires, même si l'on parvenait à éliminer de grandes quantités de CO₂ par des absorptions délibérées.

FAQ 5.3 (suite)

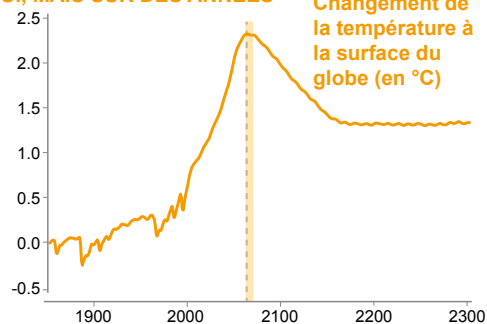
FAQ 5.3: Le changement climatique pourrait-il être inversé en éliminant du dioxyde de carbone de l'atmosphère ?

En retirant de l'atmosphère plus de dioxyde de carbone (CO₂) qu'il n'en est émis, on pourrait inverser certains aspects du changement climatique, mais certains changements se poursuivraient selon leur tendance actuelle pendant des décennies à des millénaires.

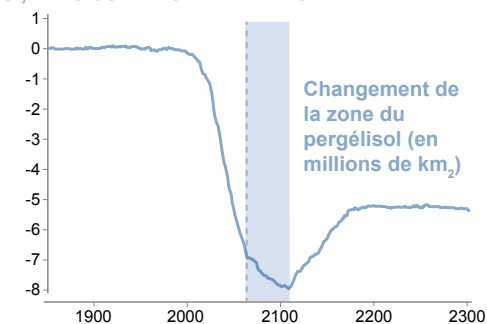
CO₂ atmosphérique (ppm)



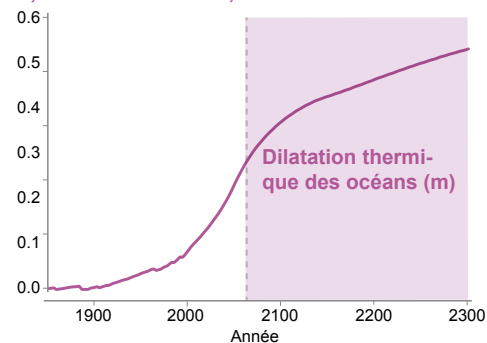
OUI, MAIS SUR DES ANNÉES



OUI, MAIS SUR DES DÉCENNIES



NON, SUR DES SIÈCLES, VOIRE DES MILLÉNAIRES



Les scénarios de « dépassement » sont une catégorie de scénarios futurs qui font l'objet d'une attention croissante, notamment dans le contexte d'objectifs climatiques ambitieux, comme la limitation du réchauffement planétaire à 1,5 °C ou 2 °C inscrite dans l'Accord de Paris. Dans ces scénarios, un rythme lent de réduction des émissions à court terme est compensé par des émissions nettes négatives de CO₂ à la fin du siècle, ce qui donne lieu à un écart ou « dépassement » temporaire par rapport au niveau de réchauffement considéré. Étant donné la réaction différée de plusieurs composantes du système climatique, il s'ensuit que le dépassement temporaire se traduirait par des changements climatiques supplémentaires par rapport à un scénario qui atteint l'objectif sans dépassement. Il faudrait des décennies, voire des siècles, pour que ces changements s'inversent, l'inversion prenant plus longtemps pour les scénarios où le dépassement est plus important.

En éliminant davantage de CO₂ de l'atmosphère qu'il n'en est émis, on commencerait effectivement à inverser certains aspects du changement climatique, mais certains changements se poursuivraient selon la direction en cours pendant des décennies à des millénaires. Les méthodes capables d'éliminer le CO₂ à grande échelle en sont encore au stade de la recherche-développement ou n'ont pas fait leurs preuves aux échelles de déploiement nécessaires pour parvenir à une réduction nette des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère. Les méthodes d'élimination du CO₂, en particulier celles qui sont destinées à être déployées sur les terres émergées, peuvent avoir des effets secondaires indésirables sur l'eau, la production alimentaire et la biodiversité.

FAQ 5.3, figure 1 | Modifications des aspects du changement climatique en réponse à un pic et à une baisse de la concentration atmosphérique de CO₂ (panneau supérieur). La ligne grise verticale discontinue indique dans tous les panneaux le moment où se produit le pic de concentration de CO₂. Elle montre que l'inversion du réchauffement à la surface du globe se produit avec un décalage de quelques années par rapport à la diminution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, que l'inversion de la réduction de la zone du pergélisol est décalée de plusieurs décennies par rapport à la diminution du CO₂ atmosphérique et que la dilatation thermique des océans se poursuit pendant plusieurs siècles. Les informations quantitatives de la figure (c'est-à-dire les chiffres sur les axes verticaux) ne doivent pas être mises en relief, car elles résultent de simulations à partir d'un seul modèle et seraient différentes pour d'autres modèles. On peut toutefois s'attendre à ce que le comportement qualitatif soit largement indépendant du modèle.

FAQ 5.4 | Que sont les budgets carbone ?

Il existe plusieurs types de budgets carbone. Le plus souvent, l'expression désigne la quantité totale nette de dioxyde de carbone (CO₂) qui peut encore être émise par les activités humaines tout en limitant le réchauffement planétaire à un niveau déterminé (par exemple à 1,5 °C ou 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels). C'est ce qu'on appelle le « budget carbone résiduel ». Plusieurs choix et jugements de valeur doivent être faits avant de pouvoir estimer celui-ci sans ambiguïté. Lorsque le budget carbone résiduel est associé à l'ensemble des émissions de CO₂ passées à ce jour, il est possible de définir un « budget carbone total » compatible avec une limite spécifique de réchauffement planétaire. Un troisième type de budget carbone est le « budget carbone historique », moyen scientifique de décrire toutes les sources et tous les puits de CO₂ passés et actuels.

L'expression « budget carbone résiduel » sert à décrire la quantité nette totale de CO₂ que les activités humaines peuvent encore rejeter dans l'atmosphère tout en maintenant le réchauffement planétaire à un niveau déterminé, par exemple à 1,5 °C ou à 2 °C par rapport aux températures préindustrielles. Les émissions de CO₂ provenant des activités humaines sont la principale cause du réchauffement planétaire. Il est possible de définir un budget carbone résiduel en raison du comportement spécifique du CO₂ dans le système Terre. Il se trouve que le réchauffement planétaire est à peu près linéairement proportionnel à la quantité nette totale des émissions de CO₂ qui sont libérées dans l'atmosphère par les activités humaines, ce qu'on appelle aussi les émissions anthropiques cumulées de CO₂. Les autres gaz à effet de serre ont un comportement différent et doivent être comptabilisés séparément.

La notion de budget carbone résiduel implique que, pour stabiliser le réchauffement planétaire à un niveau donné, les émissions mondiales de CO₂ doivent être réduites tôt ou tard à un niveau net égal à zéro. L'expression « émissions nettes de CO₂ égales à zéro » décrit une situation dans laquelle toutes les émissions anthropiques de CO₂ sont compensées par des absorptions anthropiques délibérées, de sorte qu'en moyenne, aucun CO₂ n'est ajouté ou éliminé de l'atmosphère par les activités humaines. Dans cette situation, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère diminueraient progressivement jusqu'à un niveau stable à long terme, l'excédent de CO₂ dans l'atmosphère étant absorbé par les puits océanique et terrestre (voir FAQ 5.1). La notion de budget carbone résiduel signifie aussi que, si les réductions des émissions de CO₂ sont retardées, des réductions plus importantes et plus rapides seront nécessaires par la suite pour rester dans le même budget. Si le budget carbone résiduel est dépassé, la conséquence en sera soit un réchauffement planétaire plus important, soit un impératif d'éliminer activement le CO₂ de l'atmosphère afin de ramener les températures mondiales au niveau souhaité (voir FAQ 5.3).

L'estimation de la taille des budgets carbone résiduels est fonction d'une série de choix. Ces choix se fondent sur : 1) le niveau de réchauffement planétaire choisi comme limite (à titre d'exemple, 1,5 °C ou 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels) ; 2) la probabilité avec laquelle on veut s'assurer que le réchauffement sera contenu sous cette limite (par exemple une chance sur deux, deux chances sur trois ou une probabilité plus élevée) ; et 3) la mesure dans laquelle on parvient à limiter les émissions d'autres gaz à effet de serre qui influencent le climat, comme le méthane ou l'oxyde nitreux. Ces choix peuvent être éclairés par les connaissances scientifiques, mais constituent en définitive des choix subjectifs. Une fois ces choix faits, afin d'estimer le budget carbone résiduel pour un objectif de température donné, il est possible de conjuguer les connaissances sur l'ampleur du réchauffement planétaire déjà enregistré, sur l'ampleur du réchauffement par tonne cumulée de CO₂ et sur l'ampleur du réchauffement encore attendu lorsque les émissions nettes mondiales de CO₂ auront été ramenées à zéro. Ainsi, pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels avec une probabilité d'une chance sur deux (50 %) ou sur trois (67 %), les budgets carbone résiduels s'élèvent à 500 et 400 milliards de tonnes de CO₂, respectivement, à compter du 1er janvier 2020 (FAQ 5.4, figure 1). À l'heure actuelle, les activités humaines émettent environ 40 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère par année.

Le budget carbone résiduel dépend de l'ampleur du réchauffement planétaire à ce jour. Ce réchauffement passé est dû aux émissions historiques, qui sont estimées en examinant le *budget carbone historique* – une manière scientifique de décrire toutes les sources et tous les puits de CO₂ passés et présents. Le budget carbone historique décrit comment les émissions de CO₂ provenant des activités humaines ont été redistribuées entre les différents réservoirs de CO₂ du système Terre. Ces réservoirs sont l'océan, la végétation terrestre et l'atmosphère (dans laquelle le CO₂ a été émis). La part de CO₂ qui n'est pas absorbée par l'océan ou les terres émergées, et qui augmente donc la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, est la cause du réchauffement planétaire. Le budget carbone historique nous indique que, sur les quelques 2 560 milliards environ de tonnes de CO₂ qui ont été libérées dans l'atmosphère par les activités humaines entre les années 1750 et 2019, environ un quart a été absorbé par l'océan

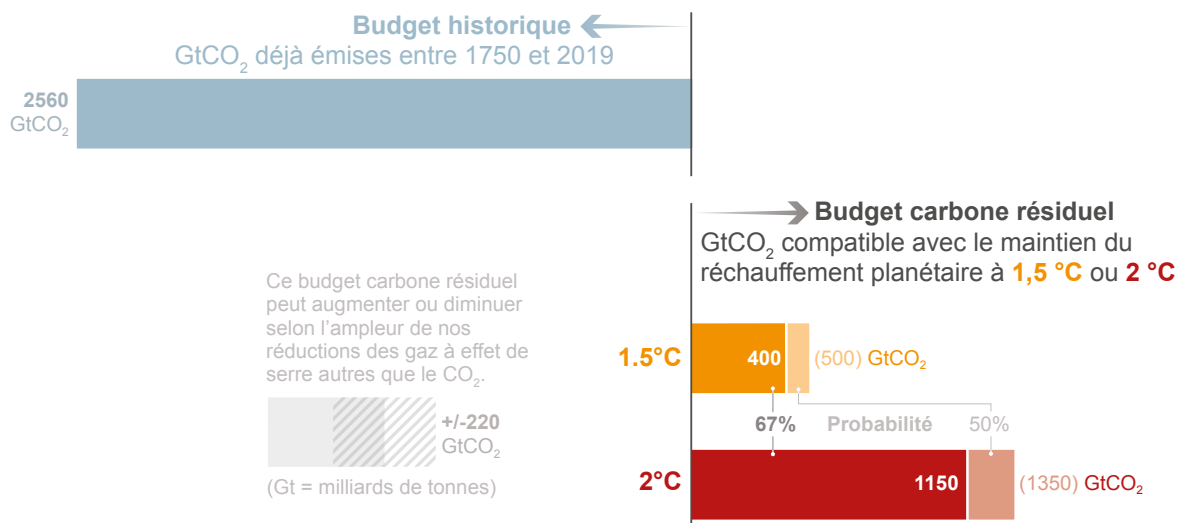
FAQ 5.4 (suite)

(ce qui est à l'origine de l'acidification de l'océan) et environ un tiers par la végétation terrestre. Environ 45 % de ces émissions sont restées dans l'atmosphère (voir FAQ 5.1). En ajoutant ces émissions historiques de CO₂ aux estimations des budgets carbone résiduels, on obtient une estimation du *budget carbone total* compatible avec tel ou tel niveau de réchauffement climatique.

En bref, la détermination d'un budget carbone résiduel – c'est-à-dire la quantité de CO₂ qui peut être libérée dans l'atmosphère tout en stabilisant la température globale en dessous d'un niveau choisi – est bien comprise mais repose sur une série de choix. Il est clair cependant que, pour contenir le réchauffement en dessous de 1,5 °C ou de 2 °C, le budget carbone résiduel à compter de 2020 est beaucoup plus faible que les émissions totales de CO₂ libérées à ce jour.

FAQ 5.4: Que sont les budgets carbone ?

L'expression « budget carbone » est utilisée de plusieurs façons. Le plus souvent, elle renvoie à la quantité totale nette de dioxyde de carbone (CO₂) qui peut encore être émise par les activités humaines tout en limitant le réchauffement climatique à un niveau donné.



FAQ 5.4, figure 1 | Différents types de budgets carbone. Les émissions historiques cumulées de dioxyde de carbone (CO₂) déterminent dans une large mesure l'ampleur du réchauffement planétaire à ce jour, tandis que le budget carbone résiduel indique combien de CO₂ pourrait encore être émis tout en contenant le réchauffement en dessous de seuils spécifiques de température. Plusieurs facteurs limitent la précision avec laquelle le budget carbone résiduel peut être estimé. Il est donc nécessaire de préciser, pour chaque estimation, la probabilité avec laquelle on cherche à limiter le réchauffement au niveau cible souhaité (à titre d'exemple, limiter le réchauffement à 1,5 °C avec une probabilité de 67 %).

FAQ 6.1 | Que sont les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie et quels effets ont-ils sur le climat ?

Les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie (SLCF) sont des composés tels que le méthane et les aérosols sulfatés qui réchauffent ou refroidissent le climat de la Terre sur des échelles de temps plus courtes – de quelques jours à quelques années – que les gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, dont l'effet climatique dure des décennies, des siècles ou davantage. Comme les SLCF ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère, leur effet sur le climat est différent d'une région à l'autre et peut changer rapidement si leurs émissions changent. Certains SLCF étant aussi préjudiciables à la qualité de l'air, les mesures d'amélioration de la qualité de l'air ont permis une forte diminution des émissions et des concentrations de ces SLCF dans nombre de régions au cours des dernières décennies.

Les SLCF comportent des gaz ainsi que de fines particules appelées *aérosols* et peuvent avoir un effet de réchauffement ou de refroidissement sur le climat (FAQ 6.1, figure 1). Ceux qui exercent un effet de réchauffement sont soit des gaz à effet de serre (tels que l'ozone ou le méthane), soit des particules comme le carbone suie, qui réchauffent le climat en absorbant de l'énergie et que l'on nomme parfois *polluants climatiques à courte durée de vie*. Ceux qui exercent un effet de refroidissement, en revanche, sont principalement constitués de particules d'aérosols (de sulfates, de nitrates et organiques, notamment) qui refroidissent le climat en réfléchissant davantage la lumière solaire incidente.

Certains SLCF n'ont pas d'incidence directe sur le climat mais produisent des composés climatiquement actifs et sont appelés précurseurs. Les SLCF peuvent être émis de façon naturelle ou résulter d'activités humaines comme l'agriculture ou l'extraction de combustibles fossiles. Souvent, les sources humaines, en particulier celles qui font intervenir une combustion, produisent des SLCF en même temps que du dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre à longue durée de vie. Les émissions ont augmenté depuis le début de l'industrialisation, et l'homme est aujourd'hui la principale source de plusieurs SLCF et de leurs précurseurs, dont le dioxyde de soufre (qui produit des aérosols de sulfates) et les oxydes d'azote (qui produisent des aérosols de nitrates et de l'ozone), en dépit des fortes réductions obtenues ces dernières décennies dans certaines régions grâce à des mesures d'amélioration de la qualité de l'air.

L'effet climatique d'un composé chimique dans l'atmosphère repose sur deux éléments : i) son efficacité à refroidir ou à réchauffer le climat (son *efficacité radiative*) et ii) le temps qu'il reste dans l'atmosphère (sa *durée de vie*). En raison de leur efficacité radiative élevée, les SLCF peuvent avoir un effet prononcé sur le climat, même si leur durée de vie est relativement courte, jusqu'à environ deux décennies après leur émission. Aujourd'hui, les effets de réchauffement et de refroidissement liés aux SLCF s'équilibrent les uns les autres, mais il est possible que cela change à l'avenir.

De par leur courte durée de vie, les SLCF ont des effets limités dans l'espace comme dans le temps. En premier lieu, parmi tous les SLCF, le méthane et les hydrocarbures halogénés à courte durée de vie sont ceux qui persistent le plus longtemps dans l'atmosphère, jusqu'à deux décennies (FAQ 6.1, figure 1). C'est une durée suffisamment longue pour qu'ils se mélangent dans l'atmosphère et se propagent à l'échelle planétaire. La plupart des autres SLCF ne restent dans l'atmosphère que quelques jours à quelques semaines, durée généralement trop courte pour qu'ils se mélangent dans l'atmosphère, parfois même à l'échelle régionale. En conséquence, les SLCF sont inégalement répartis, et leurs effets sur le climat ont une portée plus régionale que les gaz à plus longue durée de vie. En deuxième lieu, des changements rapides (mais soutenus) dans les émissions de SLCF peuvent entraîner des effets climatiques rapides.

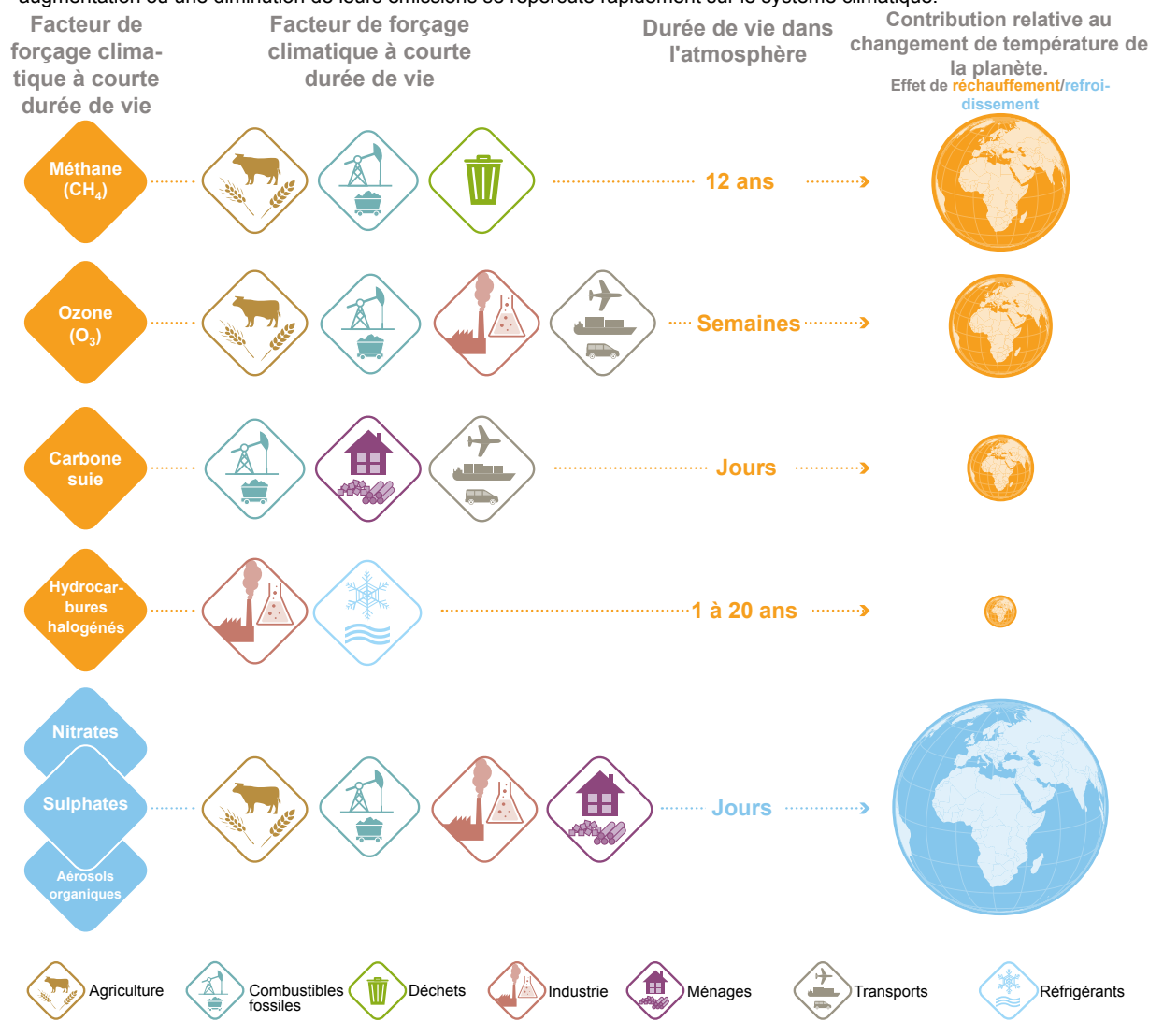
Outre leurs effets directs de réchauffement et de refroidissement, les SLCF ont d'autres conséquences nombreuses pour le système climatique et la qualité de l'air (voir la FAQ 6.2). Ainsi, le dépôt de carbone suie sur la neige en assombrit la surface, qui absorbe alors davantage d'énergie solaire, ce qui augmente la fonte et le réchauffement. Les aérosols, par ailleurs, modifient les propriétés des nuages, ce qui a des effets indirects de refroidissement sur le climat et provoque localement des changements de pluviométrie (voir FAQ 7.2). Les modèles climatiques indiquent que les SLCF ont modifié la circulation atmosphérique à l'échelle locale et même à l'échelle hémisphérique (s'agissant, par exemple, des moussons) ainsi que les précipitations régionales. Ainsi, des observations récentes montrent que la météorologie régionale est influencée par les forts contrastes régionaux qui caractérisent l'évolution des concentrations d'aérosols, particulièrement en Asie du Sud et de l'Est.

FAQ 6.1 (suite)

Si les politiques visant à limiter le changement climatique et les débats sur ce qu'il est convenu d'appeler les *budgets carbone résiduels* mettent surtout l'accent sur le dioxyde de carbone (voir FAQ 5.4), les SLCF peuvent influencer significativement les changements de température. Il est donc important de comprendre comment les SLCF fonctionnent et d'en quantifier les effets. Comme la réduction de certaines émissions de SLCF tels que le méthane peut réduire simultanément leur effet réchauffant et leurs effets néfastes sur la qualité de l'air tout en contribuant à l'atteinte des objectifs de développement durable, l'atténuation des SLCF est souvent perçue comme une option stratégique "gagnant-gagnant".

FAQ 6.1: Que sont les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie et quels effets ont-ils sur le climat ?

Les facteurs de forçage climatique à courte durée de vie ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère, de sorte qu'une augmentation ou une diminution de leurs émissions se répercute rapidement sur le système climatique.



FAQ 6.1, figure 1 | Les principaux facteurs de forçage climatique à courte durée de vie, leurs sources, leur durée de présence dans l'atmosphère et leur contribution respective aux changements de la température à la surface du globe entre 1750 et 2019 (surface du globe). Par définition, cette contribution dépend de la durée de vie, du potentiel de réchauffement/refroidissement (efficacité radiative) et des émissions de chaque composé dans l'atmosphère. Le bleu indique un refroidissement et l'orange un réchauffement. On notera qu'entre 1750 et 2019, la contribution au refroidissement des aérosols (diamants et globes bleus) a été environ deux fois moins importante que la contribution au réchauffement du dioxyde de carbone.

FAQ 6.2 | Quels sont les liens entre la limitation du changement climatique et l'amélioration de la qualité de l'air ?

Le changement climatique et la qualité de l'air sont étroitement liés. De nombreuses activités humaines qui produisent des gaz à effet de serre à longue durée de vie émettent aussi des polluants atmosphériques, et beaucoup de ces polluants atmosphériques sont également des « facteurs de forçage climatique à courte durée de vie » qui influent sur le climat. Dès lors, nombre d'options pour l'amélioration de la qualité de l'air peuvent aussi être utilisées pour limiter le changement climatique, et inversement. Toutefois, certaines options d'amélioration de la qualité de l'air provoquent un réchauffement climatique supplémentaire, et certaines mesures de lutte contre le changement climatique peuvent dégrader la qualité de l'air.

Le changement climatique et la pollution atmosphérique sont deux problèmes environnementaux critiques qui ont déjà des conséquences pour l'humanité. En 2016, l'Organisation mondiale de la santé a attribué 4,2 millions de décès dans le monde chaque année à la pollution de l'air ambiant (extérieur). Parallèlement, le changement climatique exerce des effets sur les ressources en eau, la production alimentaire, la santé humaine, les phénomènes extrêmes, l'érosion côtière, les feux de forêt et bien d'autres phénomènes.

La plupart des activités humaines, dont la production d'énergie, l'agriculture, les transports, les processus industriels, la gestion des déchets et le chauffage et la climatisation des habitations, provoquent des émissions de polluants gazeux et particulaires qui modifient la composition de l'atmosphère, ce qui a pour effet une dégradation de la qualité de l'air ainsi qu'un changement climatique. Ces polluants atmosphériques sont aussi des *facteurs de forçage climatique à courte durée de vie*, c'est-à-dire des substances qui affectent le climat mais restent dans l'atmosphère pour des périodes plus courtes (de quelques jours à quelques décennies) que les gaz à effet de serre à longue durée de vie comme le dioxyde de carbone (voir FAQ 6.1). Bien que les questions de pollution atmosphérique et de changement climatique soient intimement liées, les polluants atmosphériques et les gaz à effet de serre sont souvent définis, étudiés et réglementés indépendamment les uns des autres, tant dans la sphère scientifique que dans celle des politiques publiques.

Bon nombre de sources émettent simultanément du dioxyde de carbone et des polluants atmosphériques. Lorsque nous conduisons nos véhicules à carburant fossile ou allumons un feu de cheminée, ce n'est pas seulement du dioxyde de carbone ou des polluants atmosphériques qui sont émis, mais toujours un mélange des deux. Il n'est donc pas possible de séparer les émissions en deux groupes bien distincts. En conséquence, les politiques visant à lutter contre le changement climatique peuvent avoir des bénéfices ou des effets secondaires indésirables sur la qualité de l'air, et inversement.

Les politiques dites « gagnant-gagnant » à court terme, qui améliorent la qualité de l'air et limitent le changement climatique simultanément, incluent par exemple la mise en place de mesures d'efficacité énergétique, la capture et la récupération du méthane lors de la gestion des déchets solides et par l'industrie pétrolière et gazière, les véhicules zéro émission, les cuisinières et les chaudières efficaces et non polluantes, la filtration des suies (particules) pour les véhicules diesel, les technologies moins polluantes pour les fours à briques, les pratiques qui réduisent le brûlage des déchets agricoles et l'élimination du kérosène pour l'éclairage.

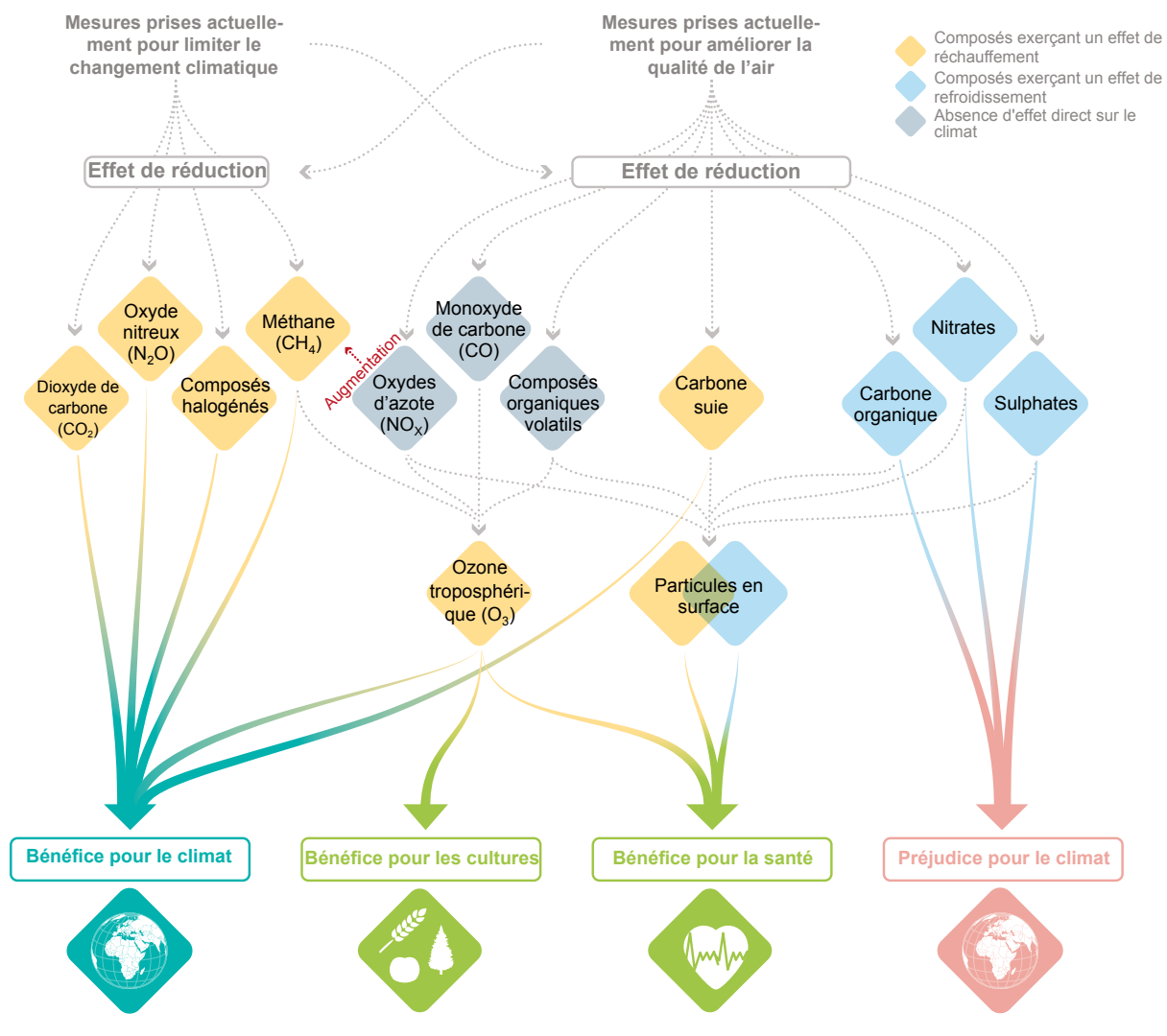
Cependant, il existe aussi des mesures « gagnant-perdant ». Ainsi, la combustion du bois est définie comme neutre en ce qui concerne le carbone car un arbre accumule la même quantité de dioxyde de carbone tout au long de sa vie que celle qui est libérée lorsque son bois est brûlé. Cependant, la combustion du bois peut aussi entraîner des émissions importantes de polluants atmosphériques tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et les particules, qui ont des effets à l'échelle locale ou régionale sur le climat, la santé humaine et les écosystèmes (FAQ 6.2, figure 1). À l'inverse, réduire la quantité d'aérosols sulfatés produits par les centrales électriques et les sites industriels ou provenant du transport maritime améliore la qualité de l'air mais entraîne un réchauffement du climat, puisque ces aérosols sulfatés contribuent à refroidir l'atmosphère en bloquant la lumière solaire incidente.

La qualité de l'air et le changement climatique sont indissociables, et aborder ces deux problèmes ensemble permettrait des synergies et des bénéfices économiques appréciables, tout en évitant les politiques qui atténuent un des deux problèmes mais aggravent l'autre.

FAQ 6.2 (suite)

FAQ 6.2: Limiter le changement climatique et améliorer la qualité de l'air ?

Le changement climatique et la qualité de l'air sont si étroitement liés qu'en traitant l'un des problèmes, on peut agir sur l'autre.



FAQ 6.2, figure 1 | Liens entre les mesures visant à limiter le changement climatique et les mesures visant à améliorer la qualité de l'air.

Les gaz à effet de serre (GES) et les aérosols (en orange et en bleu) peuvent influencer directement le climat. Les polluants atmosphériques (en bas) peuvent avoir des effets sur la santé humaine, les écosystèmes et le climat. Tous ces composés ont des sources communes et interagissent parfois dans l'atmosphère, et ne peuvent donc être étudiés séparément (flèches grises en pointillé).

FAQ 7.1 | Qu'est-ce que le bilan énergétique de la Terre et que nous apprend-il sur le changement climatique ?

Le bilan énergétique de la Terre décrit le flux d'énergie au sein du système climatique. Depuis au moins 1970, un déséquilibre persistant des flux d'énergie a conduit à l'absorption de l'excès d'énergie par le système climatique. En mesurant et en comprenant ces flux d'énergie et le rôle exercé par les activités humaines dans leur changement, nous sommes plus à même de comprendre les causes du changement climatique et de faire des projections plus précises du changement climatique futur.

Notre planète reçoit chaque jour de grandes quantités d'énergie sous forme de lumière solaire. Environ un tiers de la lumière solaire est réfléchi vers l'espace par les nuages, par des particules fines appelées *aérosols* et par des surfaces brillantes comme la neige et la glace. Le reste est absorbé par l'océan, les terres émergées, la glace et l'atmosphère. La planète renvoie ensuite de l'énergie vers l'espace sous forme de rayonnement thermique. Sur une planète qui ne se réchaufferait ou ne se refroidirait pas, ces flux d'énergie s'équilibreraient. L'activité humaine est à l'origine d'un déséquilibre dans ces flux d'énergie.

On parle, pour mesurer l'influence de divers facteurs humains et naturels sur les flux d'énergie au sommet de l'atmosphère, de *forçages radiatifs*, avec un forçage radiatif positif correspondant à un effet de réchauffement et un forçage radiatif négatif, à un effet de refroidissement. En réaction à ces forçages, le système Terre se réchauffe ou se refroidit, de façon à rétablir l'équilibre en modifiant la quantité de rayonnement thermique sortante (plus la Terre est chaude, plus elle émet de rayonnement). Les changements de température de la Terre provoquent en retour des modifications supplémentaires du système climatique (appelées *rétroactions climatiques*) qui amplifient ou atténuent l'effet initial. À titre d'exemple, la glace de mer de l'Arctique a fondu à mesure que la Terre s'est réchauffée, ce qui a réduit la quantité de lumière solaire réfléchi et ajouté au réchauffement initial (rétroaction amplificatrice). Parmi ces rétroactions climatiques, les plus incertaines sont les nuages, car ils répondent au réchauffement d'une manière complexe qui influence aussi bien l'émission de rayonnement thermique que la réflexion de la lumière solaire. Cependant, nous sommes désormais plus certains que les changements nuageux, pris dans leur ensemble, amplifieront le réchauffement du climat (voir FAQ 7.2).

Les activités humaines ont déséquilibré ces flux d'énergie de deux manières principales. En premier lieu, l'augmentation des niveaux de gaz à effet de serre a eu pour effet qu'une plus grande partie du rayonnement thermique émis est absorbée par l'atmosphère, au lieu d'être libérée dans l'espace. En second lieu, la hausse des polluants a accru la quantité d'aérosols tels que les sulfates dans l'atmosphère (voir FAQ 6.1). La lumière solaire incidente est donc réfléchi davantage, par les aérosols eux-mêmes et par la formation d'un plus grand nombre de gouttelettes nuageuses, ce qui augmente la réflectivité des nuages (voir FAQ 7.2).

Au total, le déséquilibre des flux énergétiques planétaires depuis les années 1970 est d'un peu plus d'un demi-watt par mètre carré de la surface de la Terre. Cela semble peu, mais comme le déséquilibre est persistant et que la surface de la Terre est vaste, on arrive au total à environ 25 fois la quantité totale d'énergie primaire consommée par la société humaine, relativement à la période 1971-2018. Par rapport au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (AR5), on sait aujourd'hui mieux quantifier et suivre ces flux d'énergie à partir de multiples éléments probants, notamment les données satellitaires, les mesures directes de la température de l'océan et une grande variété d'autres observations du système Terre (voir FAQ 1.1). Nous avons également une meilleure compréhension des processus qui contribuent à ce déséquilibre, notamment les interactions complexes des aérosols, des nuages et du rayonnement.

Les recherches ont montré que l'excès d'énergie depuis les années 1970 est allé principalement dans le réchauffement de l'océan (91 %), suivi par le réchauffement des terres émergées (5 %) et la fonte des nappes glaciaires et des glaciers (3 %). L'atmosphère s'est considérablement réchauffée depuis 1970, mais étant donné la couche de gaz relativement mince dont elle est constituée, elle n'a absorbé que 1 % de l'excès d'énergie (FAQ 7.1, figure 1). Comme l'océan a absorbé la plus grande partie de l'excès d'énergie, en particulier dans ses deux premiers kilomètres, on s'attend à ce que l'océan profond continue de se réchauffer et de se dilater pendant des siècles à des millénaires, ce qui provoquera une élévation du niveau de la mer à long terme, et ce même si les niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère devaient diminuer (voir FAQ 5.3). Cela viendra s'ajouter à l'élévation du niveau de la mer induite par la fonte des calottes glaciaires et des glaciers.

La compréhension du bilan énergétique de la Terre permet également de réduire l'incertitude sur les projections

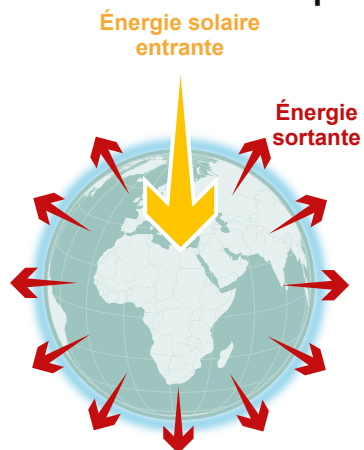
FAQ 7.1 (suite)

du climat futur. En testant les modèles climatiques par rapport à ce que nous savons du bilan énergétique de la Terre, nous pouvons faire des projections plus certaines des changements de la température de surface auxquels nous pouvons nous attendre au cours de ce siècle et par la suite.

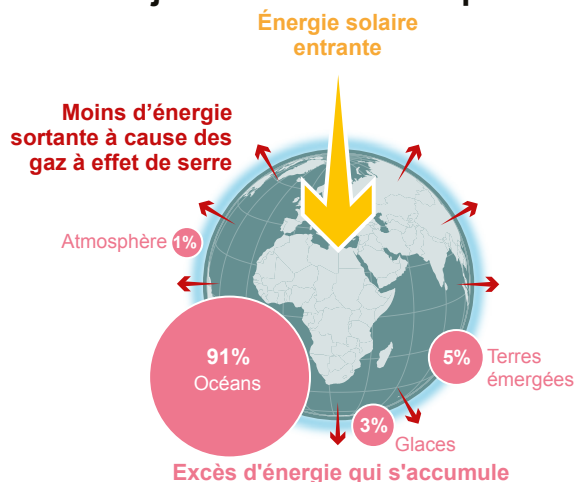
FAQ 7.1: Bilan énergétique de la Terre et changement climatique

Depuis au moins 1970, le déséquilibre persistant des flux d'énergie conduit à l'accumulation d'un excès d'énergie absorbé par les différentes composantes du système climatique.

Climat stable : en équilibre



Aujourd'hui : en déséquilibre



FAQ 7.1, figure 1 | Le bilan énergétique de la Terre compare les flux d'énergie entrants et sortants pertinents pour le système climatique. Depuis au moins les années 1970, les flux d'énergie sortants sont inférieurs au flux d'énergie entrants, ce qui entraîne un excès d'énergie qui est absorbé par l'océan, les terres émergées, la glace et l'atmosphère, l'océan en absorbant 91 %.

FAQ 7.2 | Quel est le rôle des nuages dans un climat qui se réchauffe ?

L'un des plus grands défis pour les sciences du climat a été de prévoir comment les nuages changeront dans un monde qui se réchauffe et si ces changements amplifieront ou contrebalanceront partiellement le réchauffement dû à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et à d'autres activités humaines. Les scientifiques ont fait des progrès significatifs au cours de la dernière décennie et sont aujourd'hui plus certains que le changement des nuages va amplifier, et non contrebalancer, le réchauffement planétaire à l'avenir.

Les nuages couvrent environ les deux tiers de la surface de la Terre. Ils sont constitués de petites gouttelettes et/ou de cristaux de glace, qui se forment quand la vapeur d'eau se condense ou se dépose autour de particules fines appelées *aérosols* (comme le sel marin, les poussières désertiques ou la fumée). Les nuages jouent un rôle essentiel dans le *bilan énergétique* de la Terre au sommet de notre atmosphère et influencent donc la température de la Terre en surface (voir FAQ 7.1). Les interactions des nuages et du climat sont complexes et variées. Les nuages à basse altitude ont tendance à réfléchir l'énergie solaire incidente vers l'espace, ce qui crée un effet de refroidissement en empêchant cette énergie d'atteindre et de réchauffer la Terre. En revanche, les nuages plus en altitude ont tendance à piéger (c'est-à-dire à absorber puis à émettre à une température plus basse) une partie de l'énergie qui quitte la Terre, ce qui provoque un effet de réchauffement. En moyenne, les nuages renvoient davantage d'énergie incidente que la quantité d'énergie sortante qu'ils piègent, d'où un effet global net de refroidissement sur le climat actuel. Les activités humaines depuis l'époque préindustrielle ont modifié cet effet des nuages sur le climat de deux manières différentes : en modifiant l'abondance des particules d'aérosols dans l'atmosphère et en réchauffant la surface de la Terre, principalement en raison de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

La concentration d'aérosols dans l'atmosphère a nettement augmenté depuis l'époque préindustrielle, ce qui a eu deux effets importants sur les nuages. D'une part, les nuages réfléchissent à présent davantage l'énergie incidente, car les gouttelettes des nuages sont devenues plus nombreuses et plus petites. D'autre part, des gouttelettes plus petites peuvent retarder la formation de la pluie, de sorte que les nuages se maintiennent plus longtemps, encore que cet effet reste incertain. Ainsi, les aérosols émis par les activités humaines ont eu un effet de refroidissement, contrebalançant une partie considérable du réchauffement provoqué par l'accroissement des gaz à effet de serre au cours du siècle dernier (voir FAQ 3.1). Néanmoins, on s'attend à ce que cet effet de refroidissement diminue à l'avenir, à mesure que les politiques de lutte contre la pollution atmosphérique progresseront dans le monde entier, ce qui réduira la quantité d'aérosols émis dans l'atmosphère.

Depuis la période préindustrielle, la surface et l'atmosphère de la Terre se sont réchauffées, ce qui a modifié des propriétés des nuages comme leur altitude, leur quantité et leur composition (eau ou glace), d'où certaines répercussions sur le bilan énergétique de la Terre, puis les changements de température. Cet effet en cascade des nuages, appelé *rétroaction nuageuse*, pourrait soit amplifier, soit contrebalancer une partie du réchauffement futur et constitue depuis longtemps la plus grande source d'incertitude dans les projections climatiques. Le problème vient de ce que les nuages peuvent connaître des changements nombreux et de ce que ces processus interviennent à des échelles beaucoup plus réduites que celles que les modèles climatiques globaux sont capables de représenter explicitement. Ainsi, les modèles climatiques globaux ne s'accordent pas sur la question de savoir comment les nuages, particulièrement au-dessus de l'océan subtropical, vont changer à l'avenir et si ces changements amplifieront ou réduiront le réchauffement climatique.

Depuis le dernier rapport du GIEC en 2013 (cinquième Rapport d'évaluation ou AR5), la compréhension des processus nuageux a progressé grâce à de meilleures observations, à de nouvelles méthodes d'analyse et à des simulations numériques explicites à haute résolution des nuages. Par ailleurs, les modèles climatiques globaux actuels simulent mieux le comportement des nuages que leurs prédécesseurs, tant en raison des progrès de la puissance de calcul que d'une meilleure compréhension des processus. L'ensemble de ces avancées nous permet de dresser un tableau plus complet de l'évolution future des nuages à mesure que le climat se réchauffe (FAQ 7.2, figure 1). Par exemple, la quantité de nuages bas va diminuer dans les zones océaniques subtropicales, d'où une moindre réflexion de l'énergie solaire incidente, et l'altitude des nuages hauts s'élèvera, de sorte qu'ils auront davantage tendance à piéger l'énergie sortante ; ces processus ont tous deux un effet de réchauffement. Par contre, les nuages des hautes latitudes seront de plus en plus constitués de gouttelettes d'eau plutôt que de cristaux de glace. Ce passage de cristaux de glace moins nombreux et plus gros à des gouttelettes d'eau de plus faible dimension mais plus nombreuses fera qu'une plus grande partie de l'énergie solaire incidente sera renvoyée vers l'espace et produira un effet de refroidissement. Les progrès de la compréhension de la réaction des nuages

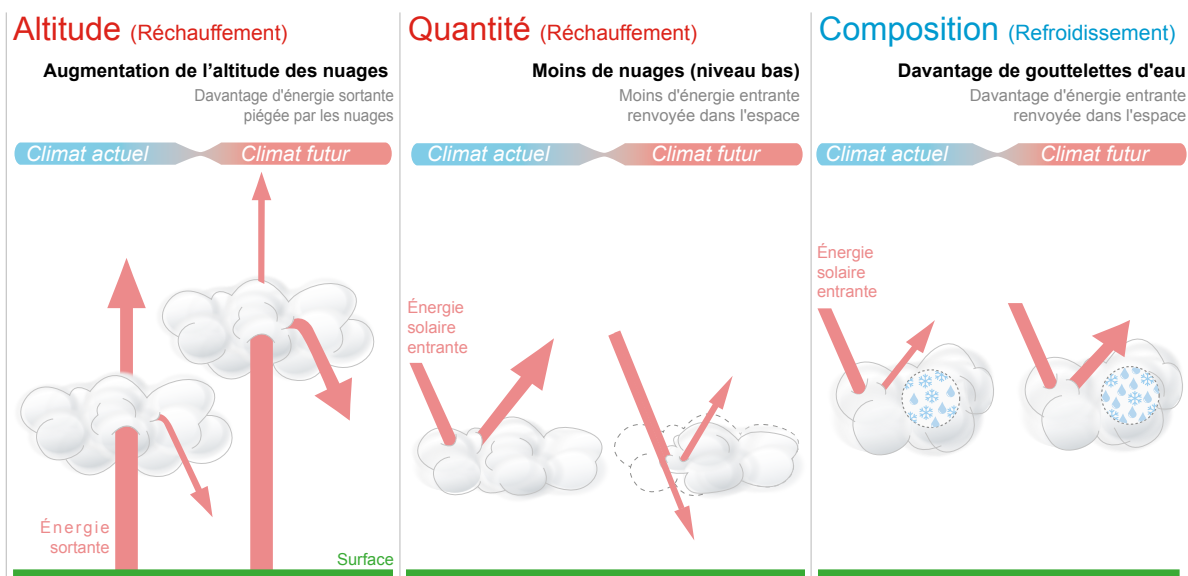
FAQ 7.2 (suite)

au réchauffement a permis d'établir avec plus de certitude qu'auparavant que les changements futurs des nuages entraîneront, dans l'ensemble, un réchauffement supplémentaire (par un affaiblissement de l'effet actuel de refroidissement des nuages). C'est ce qu'on appelle une *rétroaction nuageuse nette positive*.

En bref, les nuages amplifieront plutôt qu'ils ne réduiront le réchauffement du système climatique à l'avenir, à mesure que davantage de gaz à effet de serre et moins d'aérosols seront émis dans l'atmosphère par les activités humaines.

FAQ 7.2: Quel est le rôle des nuages dans un climat qui se réchauffe ?

Les nuages influencent le changement climatique et sont influencés par lui. Dans l'ensemble, les scientifiques s'attendent à ce que les nuages amplifient le réchauffement futur.



FAQ 7.2, figure 1 | Interactions des nuages et du climat, aujourd'hui et dans un avenir plus chaud. Le réchauffement climatique devrait modifier l'altitude (à gauche) et la quantité (au centre) des nuages, ce qui amplifiera le réchauffement. D'autre part, la composition des nuages changera (à droite), ce qui contrebalancera une partie du réchauffement. Globalement, il est attendu que les nuages amplifient le réchauffement futur.

FAQ

FAQ 7.3 | Qu'est-ce que la sensibilité du climat à l'équilibre et en quoi est-elle reliée au réchauffement à venir ?

Pour un scénario futur donné, les modèles climatiques projettent une certaine fourchette de changements de température à la surface du globe. Celle-ci est étroitement liée à la sensibilité du climat à l'équilibre (ECS), qui mesure la réponse des modèles climatiques à un doublement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les modèles à sensibilité climatique élevée projettent un réchauffement futur plus important. Certains modèles climatiques de nouvelle génération ont une sensibilité plus élevée que la fourchette de la sensibilité climatique estimée par le GIEC dans son sixième rapport d'évaluation. Dans certaines simulations, cela se traduit par un réchauffement planétaire allant jusqu'à 2 °C à 3 °C de plus que la meilleure estimation actuelle du GIEC. Bien que l'on ne s'attende pas à ce que ces niveaux de réchauffement plus élevés se produisent, les modèles à ECS élevée sont utiles pour explorer des éventualités futures à faible probabilité et fort impact.

La sensibilité du climat à l'équilibre (ECS) est définie comme le réchauffement planétaire à long terme résultant d'un doublement du dioxyde de carbone par rapport à sa concentration préindustrielle. Pour un scénario d'émissions donné, une bonne partie de l'incertitude des projections du réchauffement futur peut être expliquée par l'incertitude associée à l'ECS (FAQ 7.3, figure 1). L'importance de la sensibilité du climat à l'équilibre est reconnue depuis longtemps, et c'est le scientifique suédois Svante Arrhenius qui en a présenté la première estimation en 1896.

D'après le sixième Rapport d'évaluation, il y a 90 % de chances ou plus (*très probable*) que l'ECS soit comprise entre 2 °C et 5 °C. L'incertitude a donc sensiblement diminué par rapport au cinquième Rapport d'évaluation, qui indiquait une probabilité de 66 % (*probable*) que l'ECS soit comprise entre 1,5 °C et 4,5 °C. Cette réduction de l'incertitude a été possible, non pas en réalisant un seul progrès décisif ou une seule découverte, mais en combinant les éléments probants provenant de nombreuses sources différentes et en améliorant la compréhension de leurs points forts et de leurs faiblesses.

On dénombre quatre types principaux d'éléments probants quant à l'ECS :

- Les processus autorenforcés, appelés *boucles de rétroaction*, qui amplifient ou tempèrent le réchauffement en réaction à l'augmentation du dioxyde de carbone, sont désormais mieux compris. Par exemple, le réchauffement de l'Arctique fait fondre la glace de mer, ce qui étend la surface de la haute mer, laquelle est plus sombre et absorbe donc davantage de lumière solaire, ce qui intensifie encore le réchauffement initial. Il reste encore difficile de représenter de manière réaliste tous les processus qui interviennent dans ces boucles de rétroaction, notamment ceux liés aux nuages (voir FAQ 7.2). Ces erreurs identifiées dans les modèles sont maintenant prises en compte, et d'autres boucles de rétroaction connues mais généralement faibles, qui n'étaient d'ordinaire pas prises en considération dans les modèles, le sont désormais dans l'évaluation de l'ECS.
- Le réchauffement historique depuis le début de l'industrialisation apporte de solides preuves de la forte sensibilité du climat. Depuis 1850, les concentrations de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre ont augmenté et, de ce fait, la Terre s'est réchauffée d'environ 1,1 °C. Il est cependant difficile de se fonder sur ce réchauffement de l'époque industrielle pour estimer l'ECS car, d'une part, une partie du réchauffement provenant des gaz à effet de serre a été contrebalancée par le refroidissement provenant des particules d'aérosols et, d'autre part, l'océan est encore en train de réagir aux augmentations passées de dioxyde de carbone.
- Les éléments probants provenant de climats anciens qui avaient atteint l'équilibre avec les concentrations de gaz à effet de serre, comme la période la plus froide de la dernière période glaciaire il y a environ 20 000 ans ou des périodes plus chaudes il y a plus longtemps encore, apportent des données utiles sur l'ECS du système climatique (voir FAQ 1.3).
- Des modèles statistiques reliant les valeurs d'ECS des modèles à des changements observés comme le réchauffement planétaire depuis les années 1970 apportent des éléments probants complémentaires.

Les quatre types d'éléments probants reposent, dans une certaine mesure, sur des modèles climatiques, et au moment d'interpréter ces éléments, la diversité des modèles et la dispersion de la sensibilité climatique modélisée constituent souvent un avantage. En outre, les modèles à haute sensibilité peuvent apporter un éclairage important sur les scénarios futurs qui ont une faible probabilité de se produire mais pourraient aboutir à de forts impacts. Toutefois, à la différence des évaluations précédentes, les modèles climatiques ne sont pas considérés à eux seuls

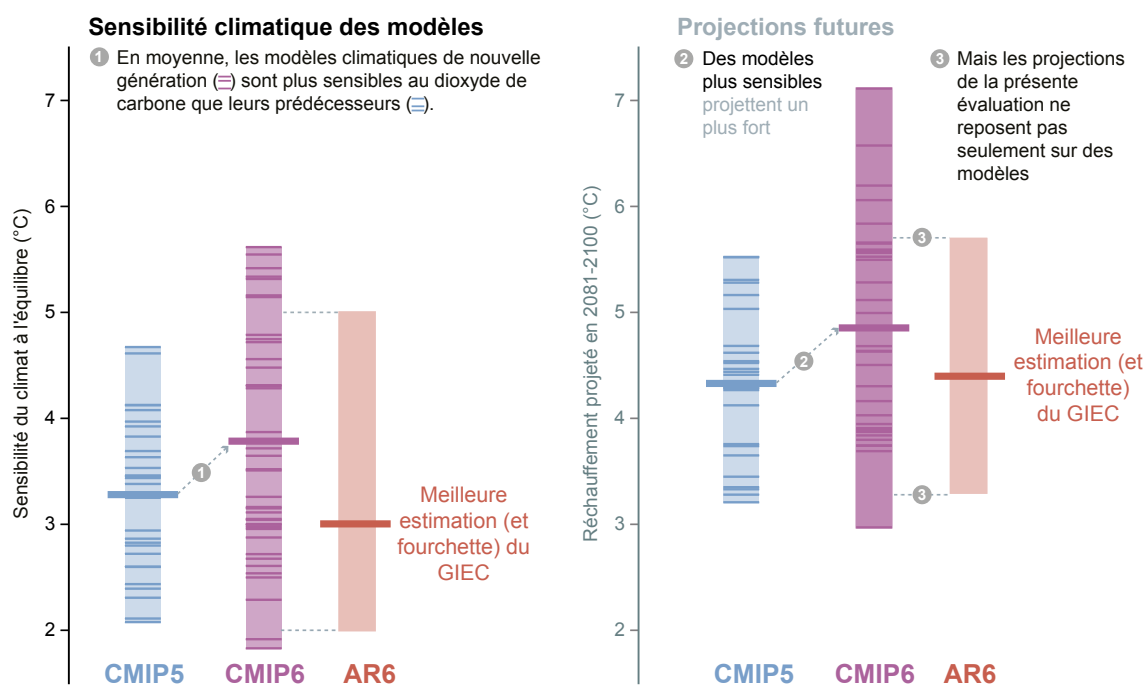
FAQ 7.3 (suite)

comme des éléments probants dans le sixième Rapport d'évaluation du GIEC.

L'ECS des derniers modèles climatiques est, en moyenne, plus élevée que celle de la génération précédente de modèles, et plus élevée également que la meilleure estimation de 3 °C indiquée dans le présent rapport. En outre, les valeurs d'ECS de certains des nouveaux modèles se situent à la fois au-dessus et en dessous de la fourchette *très probable* de 2 °C à 5 °C. Bien que ces modèles ne puissent être considérés comme non plausibles sur la seule base de leur ECS, certaines simulations produisent un changement climatique qui est incompatible avec les changements observés lorsqu'il est testé par rapport aux climats anciens. Un léger décalage entre les modèles et l'évaluation donnée dans ce rapport est parfaitement naturel, étant donné que cette évaluation repose en grande partie sur des observations et une meilleure compréhension du système climatique.

FAQ 7.3: Sensibilité du climat à l'équilibre et réchauffement futur

La sensibilité du climat à l'équilibre mesure la réponse des modèles climatiques à un doublement du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.



FAQ 7.3, figure 1 | Sensibilité du climat à l'équilibre et réchauffement futur. (À gauche) Sensibilités du climat à l'équilibre pour la génération actuelle de modèles climatiques (phase 6 du Projet de comparaison de modèles couplés – CMIP6) et pour la génération précédente (CMIP5). La fourchette évaluée dans le présent rapport (AR6) est également indiquée. (À droite) Projections climatiques de CMIP5, de CMIP6 et de l'AR6 pour les scénarios à très fortes émissions RCP8.5 et SSP5 8.5, respectivement. Les lignes horizontales épaisses représentent la moyenne multimodèle et les lignes horizontales fines, les résultats des modèles individuels. Les cases représentent les fourchettes des modèles pour CMIP5 et CMIP6 et la fourchette évaluée dans l'AR6.

FAQ

FAQ 8.1 | Comment le changement d'affectation des terres influence-t-il le cycle de l'eau ?

La façon dont l'homme utilise et modifie la couverture des sols, par exemple en convertissant des champs en zones urbaines ou en défrichant des forêts, peut influencer sur chaque aspect du cycle de l'eau. Les changements d'affectation des terres peuvent modifier les précipitations et la façon dont l'eau est absorbée par le sol, s'écoule dans les cours d'eau ou inonde la surface du sol, ainsi que la façon dont l'humidité s'évapore dans l'air. Les changements qui affectent l'un quelconque de ces aspects du cycle interconnecté de l'eau peuvent se répercuter sur l'ensemble du cycle et la disponibilité des ressources en eau douce.

La notion d'usage des terres décrit l'association entre diverses activités et la couverture des sols qui caractérise chaque zone de la surface continentale de la Terre. Une altération de cet usage peut modifier les échanges d'eau entre l'atmosphère, le sol et le sous-sol (FAQ 8.1, figure 1).

À titre d'exemple, des changements dans la couverture des sols peuvent altérer la capacité des sols à absorber l'eau de surface (infiltration). Quand le sol perd sa capacité d'absorber l'eau, les précipitations qui devraient normalement s'infiltrer et contribuer aux réserves d'eau souterraine vont au contraire déborder, ce qui augmente les eaux de surface (ruissellement) et la probabilité d'inondations. Ainsi, le remplacement de la végétation par un couvert urbain peut avoir pour conséquence que l'eau s'écoule rapidement sur les bâtiments, les routes et les voies de circulation et dans les égouts au lieu de s'infiltrer dans le sol. La déforestation de zones vastes peut aussi réduire directement l'humidité du sol, l'évaporation et les précipitations à l'échelle locale, mais peut également entraîner des changements de température à l'échelle régionale qui modifient le régime des précipitations.

Extraire de l'eau des nappes phréatiques et des cours d'eau pour l'agriculture, l'industrie et l'eau potable épuise les nappes phréatiques et peut augmenter l'évaporation en surface, car l'eau qui était auparavant dans le sol se trouve désormais en contact direct avec l'atmosphère, exposée à l'évaporation.

Le changement d'affectation des terres peut aussi modifier le degré d'humidité des sols, ce qui influence la rapidité avec laquelle les sols se réchauffent et se refroidissent et le cycle local de l'eau. Des sols plus secs évaporent moins d'eau dans l'atmosphère mais se réchauffent davantage pendant la journée. Il peut en résulter des panaches d'air plus chauds, flottant davantage, qui peuvent favoriser la formation de nuages et de précipitations si l'humidité de l'air est suffisante.

Le changement d'affectation des terres peut aussi modifier la quantité des particules d'aérosols dans l'air. Ainsi, les activités industrielles et domestiques peuvent contribuer aux émissions d'aérosols, de même que des milieux naturels comme les forêts ou les lacs salés. Les aérosols refroidissent la température de la planète en bloquant la lumière du soleil, mais ils peuvent aussi influencer la formation des nuages et donc l'occurrence des précipitations (voir FAQ 7.2).

La végétation joue un rôle important en absorbant l'humidité du sol et en évacuant l'eau dans l'air (*transpiration*) par des trous minuscules (*stomates*) qui permettent aux plantes d'absorber du dioxyde de carbone. Certaines plantes retiennent mieux l'eau que d'autres, de sorte que des changements dans la végétation peuvent modifier la quantité d'eau qui s'infiltrer dans le sol, s'écoule dans les cours d'eau ou s'évapore.

Plus généralement, le changement d'affectation des terres est responsable actuellement d'environ 15 % des émissions de dioxyde de carbone dues aux activités humaines, contribuant au réchauffement planétaire qui lui-même influence les précipitations, l'évaporation et la transpiration des plantes. En outre, des concentrations plus élevées de dioxyde de carbone dans l'atmosphère résultant des activités humaines peuvent rendre les plantes plus efficaces pour retenir l'eau car leurs stomates n'ont pas besoin de s'ouvrir autant. Une meilleure gestion des terres et de l'eau (par le reboisement ou l'irrigation durable, par exemple) peut aussi contribuer à limiter le changement climatique et à faciliter l'adaptation face à certaines de ses conséquences néfastes.

En bref, il est largement établi que le changement d'affectation des terres et de la couverture des sols modifie le cycle de l'eau à l'échelle globale, régionale et locale, en affectant les précipitations, l'évaporation, les inondations, les eaux souterraines et la disponibilité de l'eau douce pour les divers usages. Comme toutes les composantes du cycle de l'eau sont interdépendantes (et liées au cycle du carbone), le changement d'affectation des terres se répercute sur beaucoup d'autres composantes du cycle de l'eau et du système climatique.

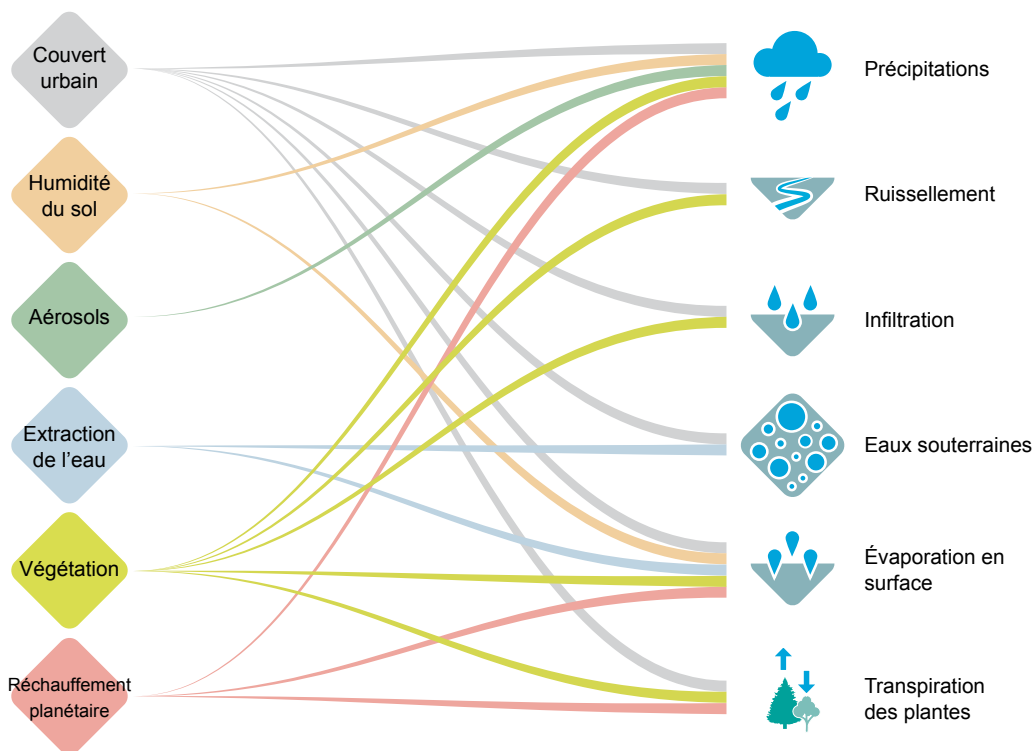
FAQ 8.1 (suite)

FAQ 8.1: Comment le changement d'affectation des terres influence-t-il le cycle de l'eau ?

Le changement d'affectation des terres affecte le cycle de l'eau de multiples façons, ce qui a ensuite des conséquences pour l'ensemble du cycle.

Le changement d'affectation des terres et ses conséquences

Effets sur le cycle de l'eau



FAQ 8.1, figure 1 | Les changements d'affectation des terres et leurs conséquences pour le cycle de l'eau. Comme toutes les composantes du cycle de l'eau sont interdépendantes, les changements affectant un aspect du cycle se répercutent sur la presque totalité du cycle.

FAQ

FAQ 8.2 | Les crues deviendront-elles plus sévères ou plus fréquentes en raison du changement climatique ?

Un climat plus chaud accroît la quantité et l'intensité des pluies pendant les épisodes humides, ce qui devrait amplifier la sévérité des inondations. Toutefois, le lien entre pluies et crues est complexe, de sorte que si les inondations les plus sévères devraient s'aggraver, elles pourraient cependant se raréfier dans certaines régions.

Les inondations sont un élément naturel et important du cycle de l'eau, mais elles peuvent aussi menacer des vies et la sécurité, perturber les activités humaines et endommager les infrastructures. La plupart des inondations à l'intérieur des terres se produisent quand les cours d'eau sortent de leur lit (*inondations fluviales*) ou lorsque des pluies intenses font que de l'eau s'accumule et déborde localement (*inondations pluviales*). Les inondations peuvent aussi être dues à l'inondation des côtes par la mer, la fonte saisonnière rapide de la neige et l'accumulation de débris, notamment de végétation ou de glace, qui empêchent l'eau de s'écouler.

Le changement climatique modifie déjà les zones, la fréquence et la gravité des inondations. À proximité des côtes, l'élévation du niveau de la mer provoque des inondations côtières de plus en plus fréquentes et sévères, et plus sévères encore si elles sont conjuguées à des pluies extrêmes. Les événements de pluies extrêmes et prolongées responsables de la plupart des inondations à l'intérieur des terres s'intensifient dans beaucoup de régions à mesure que le climat se réchauffe, car l'air proche de la surface de la Terre peut transporter environ 7 % d'eau en plus dans sa phase gazeuse (vapeur) pour chaque degré de réchauffement. Cette humidité supplémentaire est entraînée dans les systèmes météorologiques, ce qui alimente des pluies plus abondantes (FAQ 8.2, figure 1).

Un climat qui se réchauffe altère aussi la configuration des vents, ainsi que la formation et l'évolution des tempêtes et leur trajectoire habituelle. Le réchauffement accroît également les taux de condensation, ce qui libère ensuite un excédent de chaleur qui peut dynamiser les systèmes orageux et intensifier encore les pluies. Cette libération d'énergie peut en outre empêcher le soulèvement nécessaire au développement des nuages, tandis que l'augmentation de la pollution par les particules peut retarder les pluies mais renforcer les tempêtes. Ces changements signifient que le caractère des précipitations (leur fréquence, leur durée et leur intensité) continuera de changer à mesure que le climat se réchauffera.

Au-delà du changement climatique, le lieu, la fréquence et la périodicité des événements de pluies les plus extrêmes et des pires inondations est fonction des fluctuations naturelles de la configuration des vents, qui rendent certaines régions exceptionnellement humides ou sèches pendant plusieurs mois, années ou même décennies. Ces variations naturelles font qu'il est difficile de déterminer si les pluies extrêmes changent localement en raison du réchauffement planétaire. Toutefois, quand des phénomènes météorologiques naturels provoquent des pluies extrêmes et prolongées dans un climat plus chaud, leur intensité est accrue par la plus grande quantité d'humidité dans l'atmosphère.

Une intensité et une fréquence accrues des pluies quotidiennes records ont été détectées pour une grande partie des terres émergées pour lesquelles on dispose de données d'observation de bonne qualité, ce qui ne peut s'expliquer que par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre d'origine humaine. Il est également projeté que les pluies extrêmes s'intensifieront à l'avenir dans la plupart des régions. Ainsi, là où se produiront des événements météorologiques ou des saisons exceptionnellement humides, il est attendu que les quantités de pluie soient plus importantes à l'avenir, ce qui contribuera à des inondations plus sévères.

Cependant, des pluies plus abondantes n'ont pas toujours pour effet une amplification des inondations. La raison en est que les inondations dépendent aussi du type de bassin, du paysage de la surface, de l'ampleur et de la durée des pluies et du degré d'humidité du sol avant l'événement pluvieux (FAQ 8.2, figure 1). Certaines régions connaîtront un assèchement de leurs sols à mesure que le climat se réchauffera, particulièrement sous les climats subtropicaux, ce qui pourrait réduire la probabilité des inondations liées aux pluies, dont une plus grande partie pourrait être absorbée par les sols. D'un autre côté, des averses moins fréquentes mais plus intenses peuvent se traduire par des sols secs et durs, moins capables d'absorber des fortes précipitations lorsqu'elles se produisent, d'où un ruissellement plus important dans les lacs, les cours d'eau et les dépressions. Une fonte des neiges plus précoce au printemps, conjuguée à des précipitations qui tombent sous forme de pluie plutôt que de neige, peut déclencher des phénomènes d'inondations dans les régions froides. Une couverture neigeuse plus réduite en hiver peut, en revanche, diminuer le risque d'inondations résultant de la conjonction de pluies et d'une fonte rapide de la neige. La fonte rapide des glaciers et de la neige dans un climat qui se réchauffe augmente déjà l'écoulement des

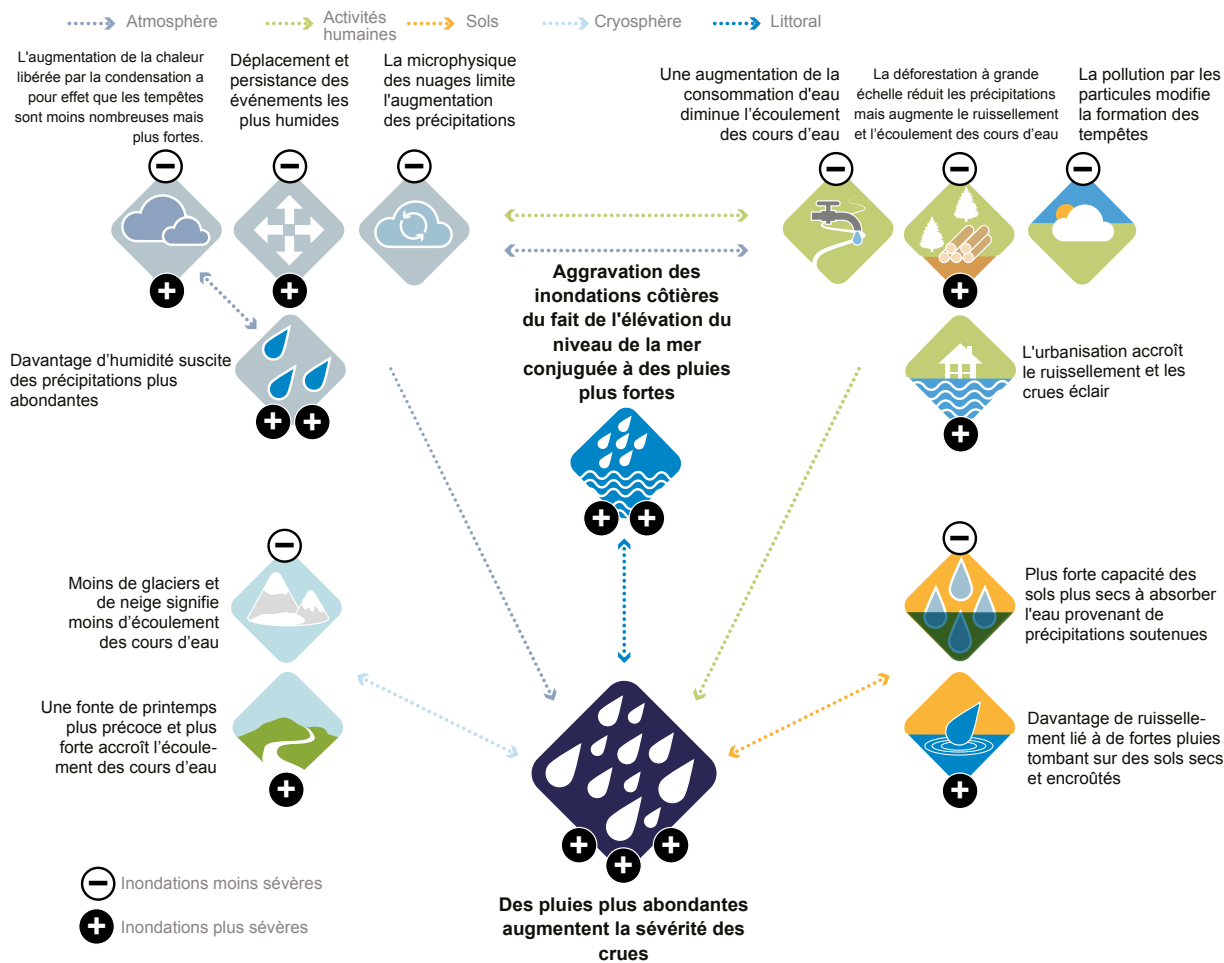
FAQ 8.2 (suite)

cours d'eau dans certaines régions, mais à mesure que les volumes de glace diminueront, l'écoulement plafonnera avant de diminuer à l'avenir. Les phénomènes d'inondations sont aussi influencés par des changements dans la gestion des terres et des systèmes fluviaux. Ainsi, le défrichement de forêts pour l'agriculture ou la construction de villes peut accélérer l'écoulement des eaux de pluie dans les cours d'eau ou les zones de faible altitude. Par contre, une extraction plus importante de l'eau des cours d'eau peut diminuer le niveau des eaux et la probabilité d'inondations.

Dans certaines régions, on a observé aussi bien une augmentation qu'une diminution des inondations, et ces changements ont été attribués à des causes multiples, y compris des modifications touchant la fonte des neiges, l'humidité du sol et les pluies. Bien que nous sachions qu'un climat qui se réchauffe intensifiera les épisodes pluvieux, les tendances locales et régionales devraient varier à la fois dans leur direction et dans leur ampleur, car le réchauffement planétaire entraîne des influences multiples et parfois contradictoires. Néanmoins, même en tenant compte des nombreux facteurs à l'origine des inondations, lorsque les conditions météorologiques provoqueront des inondations dans un futur plus chaud, ces inondations seront plus sévères.

FAQ 8.2: Causes d'une aggravation des crues sous l'effet du changement climatique

Les inondations représentent un aléa, mais les liens entre pluies et inondations ne sont pas simples. Si les plus forts épisodes d'inondation devraient s'aggraver, l'occurrence de crues pourrait diminuer dans certaines régions.



FAQ 8.2, figure 1 | Schéma illustrant les facteurs importants pour déterminer les changements dans les précipitations extrêmes et les inondations.

FAQ 8.3 | Quelles sont les causes des sécheresses, et le changement climatique va-t-il les aggraver?

Les sécheresses débutent en général par un déficit de précipitations, mais se propagent ensuite à d'autres parties du cycle de l'eau (sols, cours d'eau, neige/glace et réservoirs d'eau). Elles sont aussi influencées par des facteurs comme la température, la végétation et la gestion humaine des terres et de l'eau. Dans un monde plus chaud, l'évaporation augmente, ce qui peut rendre même les régions humides plus sensibles à la sécheresse.

Une sécheresse est définie de manière générale comme des conditions plus sèches que la normale, c'est-à-dire un déficit hydrique par rapport à la disponibilité moyenne de l'eau en un lieu et une saison donnés. Les sécheresses étant définies localement, une sécheresse affectant une région humide ne correspond pas à la même quantité de déficit en eau qu'une sécheresse affectant une région sèche. Les sécheresses sont divisées en différentes catégories selon l'aspect du cycle de l'eau où se produit le déficit hydrique : sécheresse météorologique (précipitations), sécheresse hydrologique (ruissellement, débit des cours d'eau et stockage dans les réservoirs) et sécheresse agricole ou écologique (stress des plantes dû aux effets combinés de l'évaporation et d'une faible humidité du sol). Il existe également des catégories spéciales de sécheresse. Ainsi, une sécheresse nivale se produit lorsque le manteau neigeux hivernal est inférieur à la moyenne, ce qui peut provoquer un ruissellement plus faible que la normale pendant les saisons ultérieures. Et si les épisodes de sécheresse mettent souvent des mois ou des années à se développer lentement, certains phénomènes, appelés sécheresses éclair, peuvent s'intensifier en quelques jours ou semaines. Un tel épisode s'est produit en 2012 dans la région du Midwest en Amérique du Nord et a eu de graves impacts sur la production agricole, les pertes dépassant 30 milliards de dollars des États-Unis. En général, les sécheresses ne deviennent préoccupantes que lorsqu'elles sont préjudiciables à la population (en réduisant l'eau disponible pour les besoins des villes, de l'industrie, de l'agriculture ou de la navigation) et/ou aux écosystèmes (effets néfastes sur la flore et la faune naturelles). Lorsqu'une sécheresse dure très longtemps (plus de deux décennies), on parle parfois de mégasécheresse.

La plupart des sécheresses débutent quand les précipitations sont inférieures à la normale pendant une période prolongée (sécheresse météorologique). C'est ce qui se produit généralement quand des hautes pressions atmosphériques s'installent au-dessus d'une région, réduisant la formation des nuages et les précipitations sur cette zone et repoussant les orages. Le manque de pluie se propage ensuite dans le cycle de l'eau pour créer une sécheresse agricole dans les sols et une sécheresse hydrologique dans les cours d'eau. D'autres processus contribuent à amplifier ou à atténuer les sécheresses. À titre d'exemple, si les températures sont anormalement élevées, l'évaporation augmente, asséchant les sols et les cours d'eau et exerçant sur la végétation un stress allant au-delà de ce qu'aurait occasionné le seul manque de précipitations. La végétation peut jouer un rôle essentiel car elle module bon nombre de processus hydrologiques importants (eau du sol, évapotranspiration, ruissellement). Les activités humaines peuvent aussi déterminer la sévérité d'une sécheresse ; dans le même temps, l'irrigation des terres cultivées peut réduire l'impact socioéconomique d'une sécheresse ; dans le même temps, l'épuisement des eaux souterraines des aquifères peut aggraver la sécheresse.

L'effet du changement climatique sur la sécheresse varie selon les régions. Dans les régions subtropicales, dont la Méditerranée, l'Afrique australe, le sud-ouest de l'Australie et le sud-ouest de l'Amérique du Sud, ainsi que dans les régions de l'Amérique centrale, en Afrique de l'ouest et dans le bassin de l'Amazone, on s'attend à une diminution des précipitations à mesure que le monde se réchauffe, ce qui accroît la possibilité que des sécheresses surviennent tout au long de l'année (FAQ 8.3, figure 1). Le réchauffement va réduire le manteau neigeux, amplifiant la sécheresse dans les régions où la fonte des neiges est une ressource en eau importante (dont le sud-ouest de l'Amérique du Sud). La hausse des températures entraîne une augmentation de l'évaporation, ce qui provoque un assèchement des sols, un stress accru sur les végétaux et des conséquences pour l'agriculture, même dans les régions où l'on ne s'attend pas à de grands changements des précipitations (comme dans le centre et le nord de l'Europe). Si les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas réduites, il est projeté qu'environ un tiers des terres émergées de la planète souffriront d'une sécheresse au moins modérée d'ici à 2100. D'autre part, on pourrait assister, pour certaines saisons et dans certaines zones (dont les régions de haute latitude de l'Amérique du Nord et de l'Asie et la région de mousson sud-asiatique), à une augmentation des précipitations sous l'effet du changement climatique, ce qui réduirait la probabilité des sécheresses. La figure 1 de la FAQ 8.3 met en évidence les régions où le changement climatique devrait accroître la sévérité des sécheresses.

FAQ 8.3 (suite)

FAQ 8.3: **Changement climatique et sécheresses**

Dans certaines régions, on s'attend à une aggravation des sécheresses avec le réchauffement futur.



FAQ 8.3, figure 1 | Carte schématisique indiquant en brun les régions où les sécheresses devraient s'aggraver sous l'effet du changement climatique. Cette configuration est analogue quel que soit le scénario d'émissions ; toutefois, l'ampleur du changement augmente sous l'effet d'émissions plus élevées.

FAQ

FAQ 9.1 | Est-ce possible d'inverser la poursuite de la fonte des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ? Combien de temps faudrait-il pour qu'elles se reconstituent ?

Les éléments probants du passé lointain montrent que certaines parties du système Terre peuvent mettre des centaines à des milliers d'années à s'ajuster complètement au changement climatique. Cela signifie que certaines des conséquences du changement climatique d'origine humaine persisteront pendant très longtemps, même si le niveau des gaz piégeant la chaleur dans l'atmosphère et le niveau de la température planétaire sont stabilisés ou réduits à l'avenir. C'est particulièrement vrai pour les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, qui croissent beaucoup plus lentement qu'elles ne régressent. Si la fonte actuelle de ces calottes glaciaires se poursuit pendant suffisamment longtemps, elle devient effectivement irréversible aux échelles de temps de la vie humaine, tout comme l'élévation du niveau de la mer provoquée par cette fonte.

Les activités humaines modifient le climat, et certains mécanismes amplifient le réchauffement dans les régions polaires (Arctique et Antarctique). L'Arctique se réchauffe déjà plus rapidement que toute autre région (voir FAQ 4.3). Ce fait est important car ces hautes latitudes plus froides abritent les deux dernières calottes glaciaires de la planète : l'Antarctique et le Groenland. Les calottes glaciaires sont d'immenses réservoirs d'eau douce gelée, constitués par l'accumulation de dizaines de milliers d'années de chutes de neige. Si elles devaient fondre complètement, l'eau libérée ferait s'élever le niveau de la mer d'environ 65 m. Il est donc extrêmement important de comprendre comment ces calottes glaciaires sont affectées par le réchauffement de l'océan et de l'atmosphère à proximité. Les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique sont déjà en train de réagir lentement au changement climatique récent, mais il faut beaucoup de temps à ces masses de glace gigantesques pour s'adapter aux changements de température de la planète. Autrement dit, l'intégralité des effets d'un climat qui se réchauffe peut mettre des centaines ou des milliers d'années à se manifester. Une question importante est de savoir si ces changements pourront éventuellement s'inverser, une fois que les niveaux des gaz à effet de serre dans l'atmosphère seront stabilisés ou réduits par les activités humaines et les processus naturels. Les enregistrements du passé peuvent nous aider à répondre à cette question.

Pendant les 800 000 dernières années au moins, la Terre a connu des cycles de refroidissement progressif suivis d'un réchauffement rapide sous l'effet de processus naturels. Pendant les phases de refroidissement, de plus en plus d'eau océanique se dépose progressivement sous forme de neige, ce qui fait croître les calottes glaciaires et diminuer lentement le niveau de la mer. Pendant les phases de réchauffement, les calottes glaciaires fondent plus rapidement, ce qui entraîne une élévation plus rapide du niveau de la mer (FAQ 9.1, figure 1). Les calottes glaciaires se constituent très lentement car leur croissance repose sur l'accumulation régulière de chutes de neige qui finissent par se compacter en glace. Quand le climat se refroidit, les zones qui peuvent accumuler de la neige s'étendent, renvoyant une plus grande partie du rayonnement solaire qui, sinon, maintiendrait des conditions plus chaudes sur Terre. Cela signifie qu'une fois amorcés, les climats glaciaires se développent rapidement. Toutefois, à mesure que le climat se refroidit, la quantité d'humidité que l'atmosphère peut contenir a tendance à diminuer. Dès lors, si les glaciations commencent assez rapidement, il faut des dizaines de milliers d'années aux calottes glaciaires pour croître jusqu'à être à l'équilibre avec ce climat plus froid.

Les calottes glaciaires régressent plus rapidement qu'elles ne croissent en raison de processus qui, une fois enclenchés, alimentent une perte de glace autorenforcée. Pour les calottes glaciaires qui reposent principalement sur un socle rocheux situé *au-dessus* du niveau de la mer, comme celle du Groenland, la principale boucle autorenforcée qui les influence est la « rétroaction entre l'altitude et le bilan de masse » (FAQ 9.1, figure 1, à droite). Dans cette situation, l'altitude de la surface de la calotte glaciaire diminue à mesure qu'elle fond, exposant la calotte à un air plus chaud. La surface abaissée fond alors davantage, ce qui l'abaisse encore plus rapidement, jusqu'à ce que finalement la calotte glaciaire disparaisse en totalité. Là où la calotte glaciaire repose au contraire sur un socle rocheux situé *sous* le niveau de la mer et qui devient aussi plus épais à l'intérieur des terres, comme c'est le cas de nombreuses parties de la calotte glaciaire de l'Antarctique, un processus important appelé « instabilité des calottes glaciaires marines » serait à l'origine d'un retrait rapide (FAQ 9.1, figure 1, à gauche). Le cas se produit quand la partie entourée d'eau de mer de la calotte glaciaire fond. Il en résulte un amincissement supplémentaire, qui accélère lui-même le mouvement des glaciers qui alimentent ces zones. À mesure que la calotte glaciaire s'écoule plus rapidement dans l'océan, la fonte s'accroît, ce qui provoque encore davantage d'amincissement et un écoulement encore plus rapide qui amène toujours plus de glace de glacier dans l'océan, ce qui entraîne au

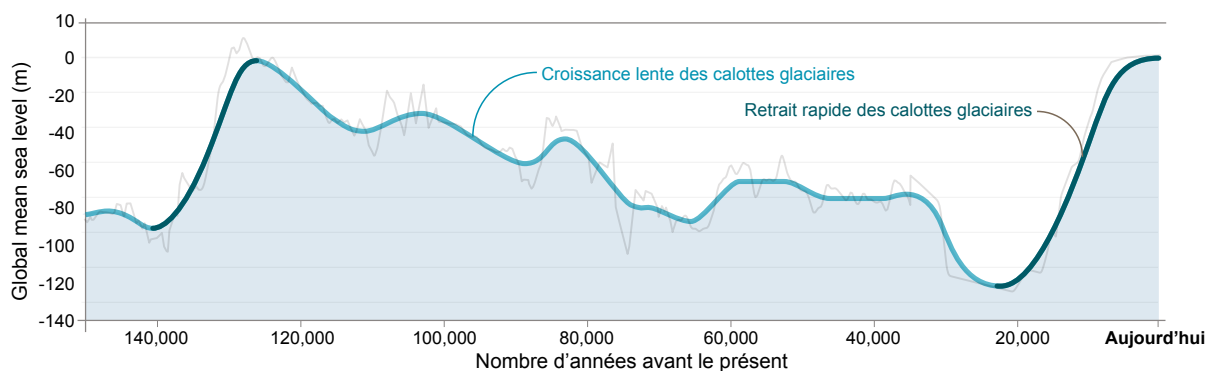
FAQ 9.1 (suite)

final la déglaciation rapide de bassins de drainage entiers de la calotte glaciaire.

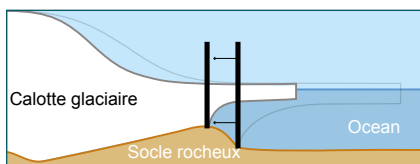
Ces processus autoreforçés (et d'autres) expliquent pourquoi des augmentations de température relativement modestes ont entraîné dans le passé une élévation très importante du niveau de la mer sur des siècles à des millénaires, alors qu'il faut des dizaines de milliers d'années pour la croissance de ces calottes qui fait d'abord diminuer le niveau de la mer. Il ressort de ces enseignements du passé que, si les changements d'origine humaine subis par les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique se poursuivent pendant le reste de ce siècle, il faudra des milliers d'années pour inverser cette fonte, même si la température de l'air diminue à l'échelle du globe au cours de ce siècle ou du siècle prochain. En ce sens, ces changements sont donc irréversibles, puisque les calottes glaciaires mettraient beaucoup plus de temps à se reconstituer que les décennies ou les siècles correspondant aux capacités de planification de la société moderne.

FAQ 9.1: La fonte des calottes glaciaires peut-elle être inversée?

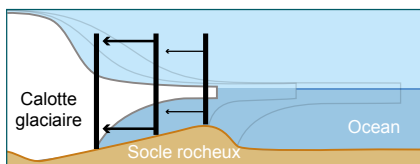
Une fois déstabilisées, les calottes glaciaires mettent des dizaines de milliers d'années à se reconstituer. Ces changements affectent fortement le niveau de la mer.



Fonte provoquée par la température de l'océan

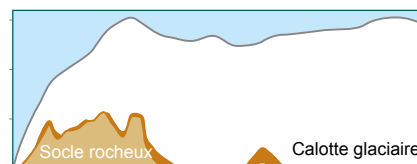


Lorsque le socle rocheux est incliné vers la mer ou est plat, le retrait cesse quand le réchauffement cesse. Lorsque la calotte glaciaire régresse, moins de glace est libérée dans l'océan

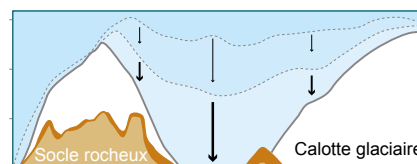


Lorsque le socle rocheux est incliné vers l'intérieur du continent, le retrait est rapide et auto-entretenu. Lorsque la calotte glaciaire régresse, davantage de glace est libérée dans l'océan

Melting driven by air temperature



La calotte glaciaire est très épaisse, donc sa surface est très haute et l'air à haute altitude est très froid



À mesure que la calotte glaciaire fond, sa surface s'abaisse jusqu'à atteindre un seuil où l'air environnant est plus chaud et fait fondre la glace encore plus rapidement

FAQ 9.1, figure 1 | Croissance et déclin des calottes glaciaires. (En haut) Les changements de volume de la calotte glaciaire modulent les variations du niveau de la mer. La ligne grise représente les données d'une série d'enregistreurs du niveau de la mer du milieu physique, comme les récifs coralliens, la ligne bleue en constituant une version lissée. (En bas à gauche) Exemple de mécanisme de déstabilisation en Antarctique. (En bas à droite) Exemple de mécanisme de déstabilisation au Groenland.

FAQ 9.2 | Quelle sera l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies ?

En 2018, le niveau moyen mondial de la mer était supérieur d'environ 15 à 25 cm à celui de 1900, et de 7 à 15 cm à celui de 1971. Le niveau de la mer continuera d'augmenter de 10 à 25 cm supplémentaires d'ici à 2050. Cette élévation actuelle du niveau de la mer s'explique principalement par la dilatation thermique de l'eau de mer à mesure que sa température augmente et par la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Les changements locaux du niveau de la mer peuvent être plus ou moins importants que la moyenne mondiale, les changements les plus faibles intervenant dans les zones qui étaient auparavant englacées, et les plus importants dans les régions de basses terres des deltas fluviaux.

Partout dans le monde, le niveau de la mer s'élève à un rythme qui s'est accéléré. Il a augmenté d'environ 4 mm par an entre 2006 et 2018, ce qui représente plus de deux fois le taux moyen relevé au XXe siècle. L'élévation du début des années 1900 résultait de facteurs naturels, comme l'ajustement des glaciers au réchauffement survenu dans l'hémisphère Nord pendant les années 1800. Or, depuis au moins 1970, les activités humaines sont la cause prédominante de l'élévation du niveau moyen de la mer dans le monde, et cela continuera d'être le cas pendant des siècles.

Le niveau de la mer s'élève par suite à la fois du réchauffement des eaux océaniques et de l'apport d'eau provenant de la fonte des glaces et des masses d'eau des terres émergées. La dilatation due au réchauffement est à l'origine d'environ la moitié de la hausse observée entre 1971 et 2018. La fonte des glaciers y a contribué à hauteur d'environ 22 % sur la même période. La fonte des deux grandes calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique y a contribué pour environ 13 % et 7 %, respectivement, de 1971 à 2018, mais la fonte s'est accélérée ces dernières décennies, portant leur contribution à 22 % et 14 % depuis 2016. Une autre source réside dans les changements intervenus dans le stockage de l'eau sur les terres émergées : les réservoirs et les aquifères y ont diminué, ce qui a contribué à une élévation du niveau de la mer d'environ 8 %.

D'ici à 2050, le niveau de la mer devrait augmenter de 10 à 25 cm supplémentaires, que les émissions de gaz à effet de serre soient réduites ou non (FAQ 9.2, figure 1). Au-delà de 2050, l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer est plus incertaine. Les émissions totales de gaz à effet de serre qui seront accumulées au cours des prochaines décennies joueront un rôle important après 2050, notamment pour déterminer à quel niveau l'élévation du niveau de la mer et les modifications de la calotte glaciaire se stabiliseront au final.

Même si l'on parvient à des émissions nettes égales à zéro, l'élévation du niveau de la mer se poursuivra du fait que l'océan profond continuera de se réchauffer et que les calottes glaciaires mettront du temps à s'ajuster au réchauffement provoqué par les émissions passées et actuelles : l'océan et les calottes glaciaires sont lents à réagir aux changements environnementaux (voir FAQ 5.3). D'après certaines projections de scénarios d'émissions basses, l'élévation du niveau de la mer se poursuivra à un rythme comparable à celui d'aujourd'hui quand les émissions se rapprocheront de zéro net (de 3 à 8 mm par an d'ici à 2100, au lieu de 3 à 4 mm par an en 2015), tandis que d'autres projections, elle s'accélérera fortement, jusqu'à cinq fois le rythme actuel, d'ici à 2100, en particulier si les émissions continuent d'être élevées et si les processus qui accélèrent le retrait de la calotte glaciaire de l'Antarctique se manifestent largement (FAQ 9.1).

L'élévation du niveau de la mer augmentera la fréquence et la sévérité des événements extrêmes de niveau marin sur les côtes (voir FAQ 8.2), y compris les ondes de tempête, les submersions par les vagues et les inondations dues aux marées : le risque peut être augmenté même par des changements minimes du niveau moyen global de la mer. Les scientifiques prévoient que, dans certaines régions, des événements extrêmes de niveau marin qui, récemment encore, devaient se produire une fois tous les 100 ans se produiront annuellement pour 20 à 25 % des endroits d'ici à 2050 quelles que soient les émissions, mais que d'ici à 2100, le choix des émissions aura une grande importance, la fréquence annuelle passant à 60 % des endroits en cas d'émissions basses et à 80 % des endroits en cas de fortes émissions.

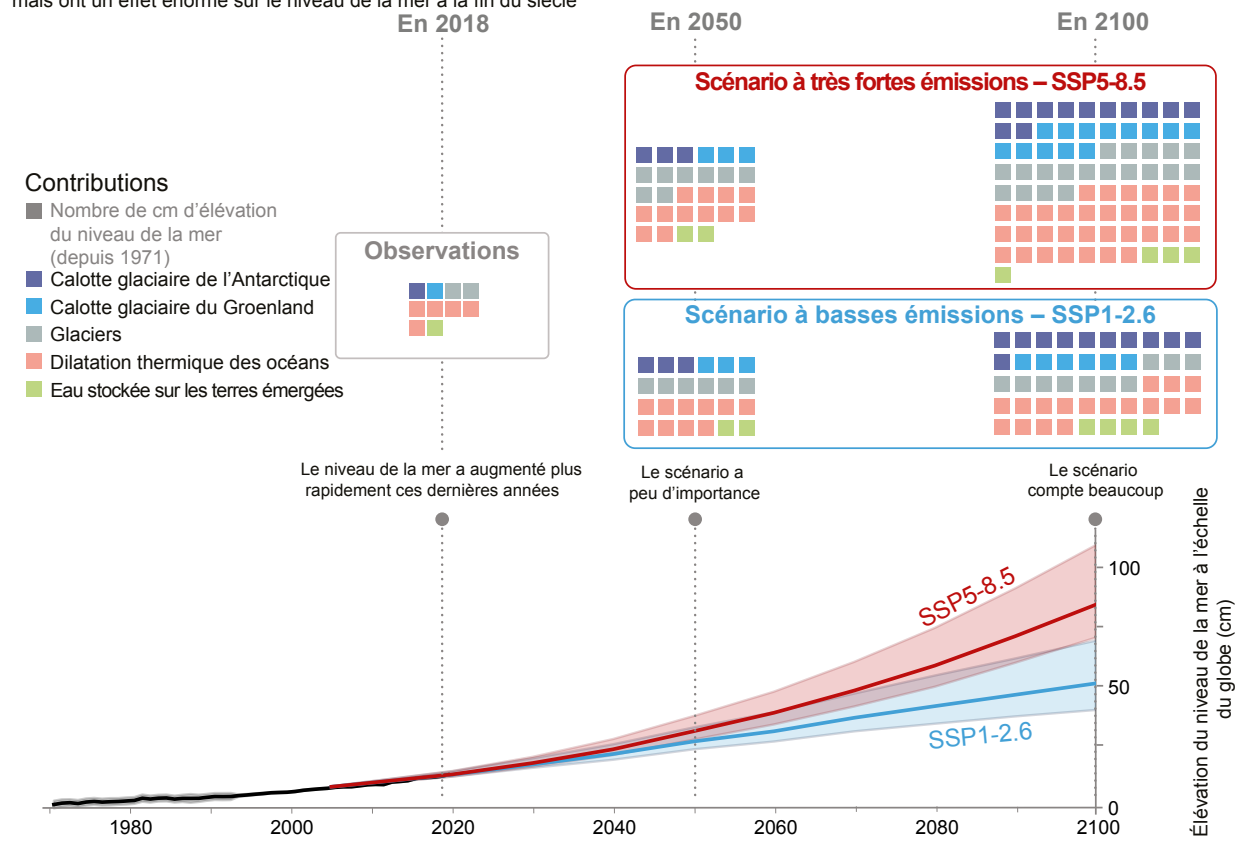
Dans beaucoup d'endroits, la variation locale du niveau de la mer sera plus élevée ou plus faible que la moyenne mondiale. Selon l'année et l'endroit, les changements dans la circulation océanique et les vents peuvent susciter un changement du niveau local de la mer. Dans les régions où de grandes calottes glaciaires, telles que la Fennoscandienne en Eurasie et les Laurentides et la Cordillère en Amérique du Nord, ont recouvert les terres

FAQ 9.2 (suite)

pendant la dernière période glaciaire, celles-ci continuent encore aujourd’hui de se soulever lentement maintenant que le poids supplémentaire des calottes glaciaires a disparu. Ce rebond local compense l’élévation du niveau global de la mer dans ces régions et peut même entraîner une diminution locale du niveau de la mer. Dans les régions situées juste après la limite de l’extension des anciennes calottes glaciaires et où la Terre s’était bombée vers le haut, la surface s’affaisse désormais, et l’élévation locale du niveau de la mer y est donc plus rapide que le rythme global. Dans beaucoup de régions de delta à faible altitude (comme la Nouvelle-Orléans et le delta du Gange-Brahmapoutre), les terres s’affaissent rapidement (s’enfoncent) en raison d’activités humaines comme la construction de barrages ou l’extraction d’eaux souterraines et de combustibles fossiles. En outre, lorsqu’une calotte glaciaire fond, elle exerce une moindre attraction gravitationnelle sur l’eau de l’océan à proximité. Cette réduction de l’attraction gravitationnelle fait baisser le niveau de la mer à proximité de la calotte glaciaire (qui est désormais moins massive) tout en faisant monter ce niveau plus loin. La fonte des calottes polaires provoque donc la plus forte élévation du niveau de la mer dans l’hémisphère opposé ou aux basses latitudes, avec une différence pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres entre les régions d’ici à 2100.

FAQ 9.2: Quelle sera l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies ?

Les scénarios d'émissions ont peu d'influence sur l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies, mais ont un effet énorme sur le niveau de la mer à la fin du siècle



FAQ 9.2, figure 1 | Élévation observée et projetée du niveau moyen global de la mer et contributions de ses principales composantes.

FAQ 9.3 | Le Gulf Stream va-t-il s'arrêter ?

Le Gulf Stream fait partie de deux systèmes de circulation océanique de l'Atlantique Nord : la circulation méridienne de retournement en Atlantique (AMOC) et le gyre subtropical de l'Atlantique Nord. Certaines études scientifiques, basées sur des modèles et des travaux théoriques, indiquent que si l'AMOC devrait ralentir sous l'effet du réchauffement climatique, le Gulf Stream ne connaîtra pas beaucoup de changement et ne s'arrêterait pas totalement, même si cela se produisait pour l'AMOC. La plupart des modèles climatiques projettent un ralentissement de l'AMOC à la fin du XXe siècle dans la plupart des scénarios d'émissions, et certains indiquent qu'il ralentira encore plus tôt. Le Gulf Stream influence le climat et le niveau de la mer, et donc s'il ralentit, on assistera à une élévation du niveau de la mer en Amérique du Nord, et il y aura des conséquences pour les conditions météorologiques en Europe et son taux de réchauffement relatif.

Le Gulf Stream est le plus vaste courant de l'océan Atlantique Nord. Il transporte environ 30 milliards de kilogrammes d'eau par seconde vers le nord en longeant la côte est de l'Amérique du Nord. Il s'agit d'un courant chaud, dont la température dépasse celle des eaux environnantes de 5 °C à 15 °C, et qui transporte donc des eaux plus chaudes (de l'énergie thermique) depuis le sud où il prend sa source et libère de la chaleur dans l'atmosphère et les eaux environnantes.

Le Gulf Stream fait partie de deux grandes circulations, la circulation méridienne de retournement en Atlantique (AMOC) et le gyre subtropical de l'Atlantique Nord (FAQ 9.3, figure 1). La rotation de la Terre fait que les grands courants des deux circulations restent sur le côté ouest de leur bassin, ce qui, dans l'Atlantique, signifie que les circulations se conjuguent pour former le Gulf Stream. D'autres grands courants contribuent aux gyres, comme le Kuroshio dans le Pacifique Nord et le courant est-australien dans le Pacifique Sud, mais le rôle double du Gulf Stream rend celui-ci particulier. Il n'existe pas de circulation de retournement profonde comparable à l'AMOC dans le Pacifique Nord, où le Kuroshio ne joue donc qu'un seul rôle dans le gyre dont il fait partie.

Les gyres, qui font circuler les eaux de surface, résultent principalement des vents qui entraînent la circulation. Ces vents ne devraient pas beaucoup changer et donc les gyres non plus, ce qui signifie que ceux qui font partie du Gulf Stream et du Kuroshio continueront de transporter de l'énergie thermique vers le pôle à partir de l'équateur, d'une façon largement comparable à ce qui existe actuellement. La contribution des gyres au Gulf Stream est de 2 à 10 fois plus importante que la contribution de l'AMOC.

Le rôle du Gulf Stream dans l'AMOC consiste à fournir de l'eau de surface qui se refroidit, devient plus dense et coule pour former des eaux froides et profondes qui retournent vers l'équateur, en se déversant sur le relief du plancher océanique et en se mélangeant aux autres eaux profondes de l'Atlantique pour former un courant vers le sud à une profondeur d'environ 1 500 mètres sous le Gulf Stream. Ce courant de retournement est l'AMOC, le Gulf Stream s'écoulant vers le nord dans le kilomètre supérieur, et les eaux profondes plus froides s'écoulant vers le sud.

L'AMOC devrait ralentir au cours des prochains siècles. L'une des raisons en est la baisse de salinité des eaux océaniques, causée par l'eau de fonte du Groenland, le changement de la glace de mer de l'Arctique et l'augmentation des précipitations dans les mers septentrionales plus chaudes. Un dispositif de bouées ancrées à travers l'Atlantique surveille l'AMOC depuis 2004 ; ses capacités ont été étendues dans la période récente. La surveillance de l'AMOC n'existe pas depuis assez longtemps pour qu'une tendance émerge de la variabilité et pour pouvoir détecter les changements à long terme qui pourraient être à l'œuvre (voir FAQ 1.2). D'autres signes indirects indiquent peut-être un ralentissement du retournement, par exemple un réchauffement plus lent à l'endroit où les eaux de surface du Gulf Stream s'enfoncent. Les modèles climatiques montrent que ce « point froid » de réchauffement plus lent que la moyenne se produit lorsque l'AMOC s'affaiblit et prévoient que cela se poursuivra. D'après les données paléoclimatiques, l'AMOC a connu des changements importants par le passé, en particulier lors du passage de climats plus froids à des climats plus chauds, mais est stable depuis 8 000 ans.

Que se passera-t-il si l'AMOC ralentit dans un monde qui se réchauffe ? L'atmosphère s'adaptera quelque peu en transportant davantage de chaleur, ce qui compensera en partie la diminution de la chaleur transportée par l'AMOC. Mais en raison du « point froid », certaines régions de l'Europe se réchaufferont plus lentement. D'après les modèles, cela affectera les régimes de temps du Groenland et de la région de l'Atlantique, avec une diminution des précipitations aux latitudes moyennes, un déplacement spatial des bandes de fortes précipitations dans les tropiques et en Europe et des tempêtes plus fortes dans la trajectoire des tempêtes de l'Atlantique Nord. Le ralentissement de ce courant, conjugué à la rotation de la Terre, signifie que le niveau de la mer s'élèvera en

FAQ 9.3 (suite)

Amérique du Nord à mesure que la contribution de l'AMOC au Gulf Stream ralentira.

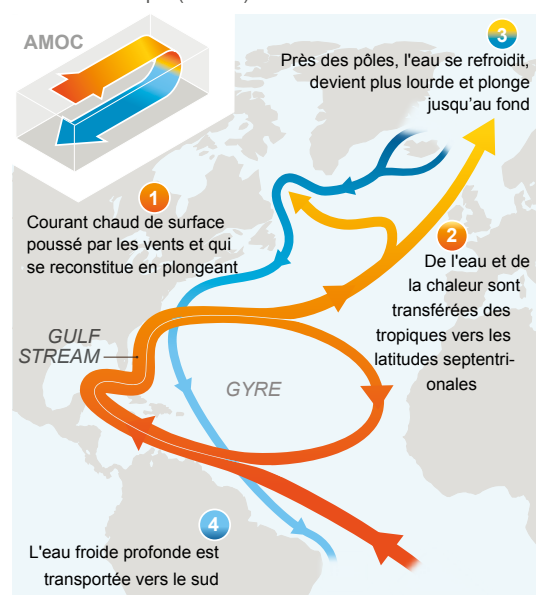
L'Atlantique Nord n'est pas le seul site de retournement méridien sensible. Autour de l'Antarctique, l'eau de mer la plus dense de la planète se forme lorsque la congélation de la glace de mer laisse après celle-ci une eau salée et froide qui plonge jusqu'au fond et se répand vers le nord. Des études récentes ont montré que la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique et le changement des vents de l'océan Austral peuvent influencer ce retournement méridien, ce qui peut affecter la météorologie à l'échelle régionale.

FAQ 9.3: Le Gulf Stream va-t-il s'arrêter?

Le Gulf Stream, courant chaud, devrait s'affaiblir mais non s'arrêter. Ce ralentissement affectera les conditions météorologiques et le niveau de la mer à l'échelle régionale.

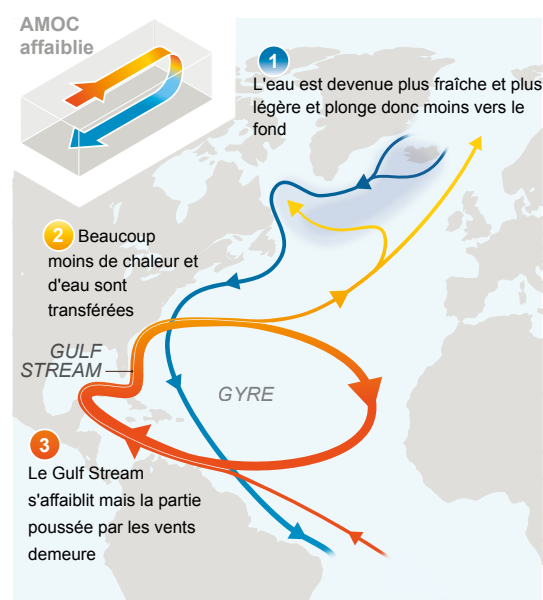
Aujourd'hui

Le Gulf Stream fait partie aussi bien du gyre subtropical – horizontal – que de la circulation méridienne de retournement en Atlantique (AMOC) – verticale.



Dans un monde plus chaud

Le changement climatique affaiblit l'AMOC, ce qui ralentit le Gulf Stream



FAQ 9.3, figure 1 | Circulations horizontale (gyre) et verticale (circulation méridienne de retournement en Atlantique – AMOC) dans l'Atlantique aujourd'hui (à gauche) et dans un monde plus chaud (à droite). Le Gulf Stream est un courant chaud composé des deux circulations.

FAQ

FAQ 10.1 | Comment peut-on fournir des informations climatiques utiles aux parties prenantes régionales ?

Le monde est physiquement et culturellement diversifié, et les défis posés par le changement climatique varient selon les régions et les lieux. Étant donné que le changement climatique affecte de nombreux aspects du travail et de la vie quotidienne des personnes, les informations sur celui-ci peuvent aider à la prise de décision, mais seulement si elles sont pertinentes pour les personnes impliquées dans ces décisions. Les utilisateurs des informations climatiques peuvent être très divers, allant de professionnels dans des domaines comme la santé humaine, l'agriculture ou la gestion de l'eau, à des communautés humaines au sens large qui subissent les effets du changement climatique. Pour fournir des informations utiles à la prise de mesures, il est donc nécessaire d'impliquer l'ensemble des parties prenantes concernées, leurs connaissances et leurs expériences, de formuler des informations appropriées et de parvenir à une compréhension mutuelle de l'utilité et des limites de ces informations.

L'élaboration, la diffusion et l'utilisation des informations sur le changement climatique nécessitent la participation de toutes les parties concernées : celles qui produisent les données et les connaissances sur le climat, celles qui les communiquent et celles qui relient cette information à leur connaissance de la collectivité, de la région ou de l'activité sur laquelle le changement climatique peut avoir une incidence. Pour réussir, ces parties doivent travailler ensemble pour explorer les données climatiques et élaborer ainsi conjointement les informations climatiques nécessaires à la prise de décisions ou à la résolution de problèmes, en distillant les résultats des diverses sources de connaissance du climat pour en extraire les informations climatiques pertinentes. Les partenariats efficaces sont ceux qui tiennent compte de la diversité de toutes les parties concernées et y répondent (y compris leurs valeurs, leurs croyances et leurs intérêts), en particulier lorsqu'ils impliquent des groupes culturellement divers et leurs connaissances autochtones et locales de la météo, du climat et de leur propre société. Cela vaut particulièrement pour le changement climatique, problème mondial qui soulève des défis propres à chaque région. Le fait de reconnaître cette diversité rend les informations climatiques pertinentes et crédibles, notamment lorsqu'il s'agit de transmettre la complexité des risques pour les systèmes humains et les écosystèmes en vue de renforcer la résilience.

Pour construire des informations climatiques utiles, il faut prendre en compte toutes les sources disponibles pour établir la représentation la plus complète possible des changements projetés et distiller les informations de manière à répondre aux besoins des parties prenantes et des communautés qui seront touchées par ces changements. Ainsi, les climatologues peuvent communiquer des informations sur les changements futurs en utilisant des simulations du climat planétaire et/ou régional pour en déduire les changements des conditions météorologiques influençant une région. Un processus de distillation efficace (FAQ 10.1, figure 1) associe le public auquel s'adresse l'information, en particulier les parties prenantes dont le travail fait intervenir des facteurs non climatiques, comme la santé humaine, l'agriculture ou les ressources en eau. La distillation évalue l'exactitude de toutes les sources d'information (observations, simulations, avis d'experts), jauge la crédibilité d'éventuelles informations contradictoires et aboutit à des informations climatiques pour lesquelles on aura estimé le degré de confiance que les utilisateurs devraient leur accorder. Les producteurs de données climatiques doivent aussi garder à l'esprit que les régions géographiques et les périodes qui intéressent les parties prenantes (par exemple la saison de croissance d'une zone agricole) peuvent ne pas bien correspondre à la résolution temporelle et spatiale des données climatiques disponibles ; des développements supplémentaires des modèles ou du traitement de données peuvent donc être nécessaires pour extraire des informations climatiques utiles.

Un moyen de distiller des informations complexes adaptées aux applications des parties prenantes est de relier ces informations à l'expérience déjà vécue par les parties prenantes à l'aide de trames narratives qui sont des déroulements plausibles d'événements météorologiques et climatiques liés aux expériences des parties prenantes. Le dialogue entre les parties prenantes et les climatologues permet de déterminer les aspects de leurs expériences les plus pertinentes à évaluer pour un éventuel comportement futur. La mise au point de trames narratives fait appel à l'expérience et aux connaissances spécialisées de parties prenantes comme les gestionnaires des ressources en eau et les professionnels de santé, qui souhaitent mettre au point des mesures de réponse appropriées. Les trames narratives sont donc une voie d'accès au processus de distillation qui peut rendre les informations climatiques plus accessibles et plus concrètement intelligibles. Une trame narrative peut ainsi partir d'une expérience commune telle qu'une situation de sécheresse prolongée, où les ressources en eau disponibles sont raréfiées et où les récoltes ont été endommagées, et montrer comment les sécheresses pourraient évoluer à l'avenir et se caractériser peut-être par un déficit de précipitations encore accru ou une durée encore plus longue. Grâce à des choix appropriés, les trames narratives peuvent aborder judicieusement les nuances des informations climatiques en partant des

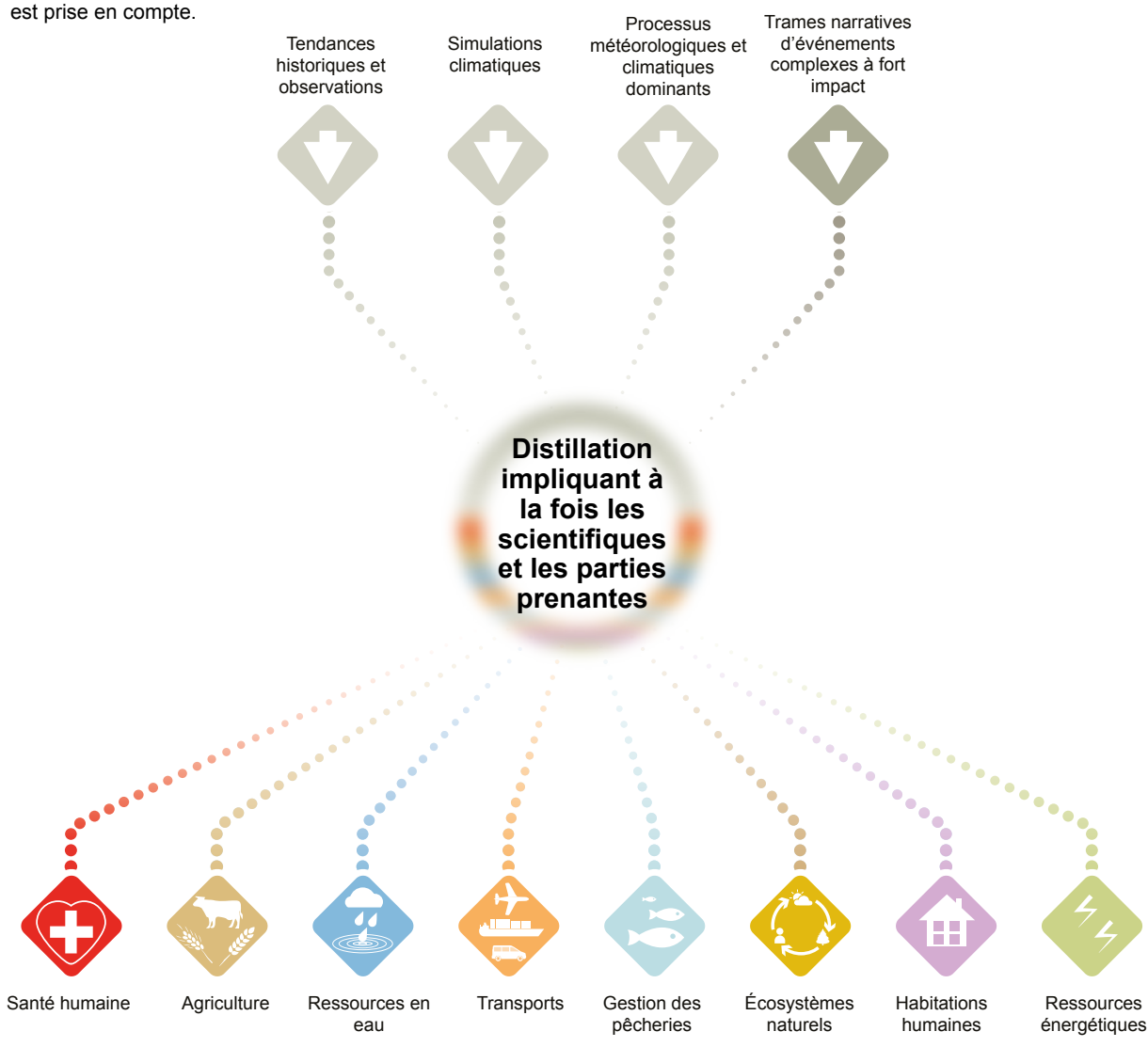
FAQ 10.1 (suite)

expériences communes, ce qui renforce l'utilité des informations.

La création de partenariats entre toutes les personnes impliquées dans la production, l'exploration et la distillation des données climatiques sous forme d'informations climatiques est au cœur de la création d'informations pertinentes pour les parties prenantes. Ces partenariats peuvent passer par une interaction directe des climatologues et des parties prenantes ainsi que par le biais d'organisations qui ont vu le jour pour faciliter ce processus, parmi lesquelles des services climatiques, des forums nationaux et régionaux sur le climat et des sociétés de conseil fournissant des informations climatiques spécialisées. Ces organisations dites « frontières » peuvent répondre aux besoins divers de tous ceux qui souhaitent intégrer les informations climatiques dans leurs processus décisionnels. Tous ces partenariats sont essentiels pour parvenir à des informations climatiques qui répondent à la diversité physique et culturelle et aux défis posés par le changement climatique, lesquels varient d'une région à l'autre dans le monde.

FAQ 10.1: Comment les scientifiques peuvent-ils fournir des informations climatiques régionales utiles ?

Pour la prise de décisions, les informations climatiques sont plus utiles si la diversité physique et culturelle à travers le monde est prise en compte.



FAQ 10.1, figure 1 | Les informations climatiques destinées aux décideurs sont plus utiles si l'on tient compte de la diversité physique et culturelle dans le monde. La figure illustre sous forme de schéma le large éventail de connaissances qui doivent être synthétisées en fonction de la diversité des utilisateurs pour distiller des informations qui soient utiles et crédibles. Cette intégration ou distillation doit faire appel aux valeurs et aux connaissances des parties prenantes et des scientifiques. La rangée du bas indique de façon non exhaustive des exemples d'intérêts des parties prenantes. Dans le cadre de cette distillation, les résultats peuvent faire progresser les objectifs de développement durable des Nations Unies, dont il est question en partie dans ces exemples.

FAQ 10.2 | Pourquoi les villes sont-elles des « points chauds » du réchauffement climatique ?

Dans les zones urbaines, la température de l'air peut être supérieure de plusieurs degrés Celsius à celle des zones environnantes, en particulier pendant la nuit. Cet effet d'« îlot de chaleur urbain » résulte de plusieurs facteurs, dont la moindre ventilation et le piégeage de la chaleur en raison de la proximité de grands bâtiments, la chaleur directement produite par les activités humaines, les propriétés d'absorption de la chaleur du béton et d'autres matériaux de construction urbaine et la quantité réduite de végétation. La poursuite de l'urbanisation et les vagues de chaleur de plus en plus sévères du fait du changement climatique amplifieront encore cet effet à l'avenir.

Aujourd'hui, les villes abritent 55 % de la population mondiale. Ce chiffre est en augmentation et les villes accueillent chaque année 67 millions de nouveaux habitants, dont 90 % s'installent dans les villes de pays en développement. D'ici à 2030, près de 60 % de la population mondiale devrait vivre dans des zones urbaines. Les villes et leurs habitants sont très vulnérables aux extrêmes météorologiques et climatiques, particulièrement aux vagues de chaleur, car les zones urbaines sont déjà des points chauds locaux. Les villes sont généralement plus chaudes, jusqu'à plusieurs degrés Celsius de plus la nuit, que les zones environnantes. Cet effet de réchauffement, appelé îlot de chaleur urbain, vient du fait que les villes reçoivent et retiennent davantage de chaleur que les zones rurales environnantes et que les processus de refroidissement naturels sont affaiblis dans les villes par rapport aux zones rurales.

Trois facteurs principaux contribuent à amplifier le réchauffement des zones urbaines (barres orange à la FAQ 10.2, figure 1). Celui qui y contribue le plus vient de la géométrie urbaine, laquelle est fonction du nombre de bâtiments, de leur taille et de leur proximité. Les grands bâtiments proches les uns des autres absorbent et stockent la chaleur et réduisent aussi la ventilation naturelle. Les activités humaines, qui sont très concentrées dans les villes, réchauffent aussi directement l'atmosphère à l'échelle locale en raison de la chaleur dégagée par les systèmes domestiques et industriels de chauffage ou de refroidissement, les moteurs en marche et d'autres sources. Enfin, le réchauffement urbain résulte aussi directement des propriétés de rétention de la chaleur des matériaux dont sont faites les villes, y compris les bâtiments en béton, les chaussées en asphalte et les toits sombres. Ces matériaux sont très efficaces pour absorber et retenir la chaleur, puis réémettre celle-ci la nuit.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est encore amplifié dans les villes dépourvues de végétation et de plans d'eau, deux éléments qui peuvent contribuer fortement au refroidissement local (barres vertes à la FAQ 10.2, figure 1). Cela signifie que lorsque le tissu urbain comporte suffisamment de végétation et d'eau, cela peut compenser l'effet d'îlot de chaleur urbain, jusqu'à le neutraliser complètement dans certains quartiers.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est un phénomène bien connu et bien compris. Ainsi, les mesures de température effectuées à partir de thermomètres installés dans les villes sont corrigées de cet effet pour calculer les tendances du réchauffement planétaire. Néanmoins, les observations, y compris les mesures à long terme de l'effet d'îlot de chaleur urbain, sont trop limitées à l'heure actuelle pour permettre d'acquérir une compréhension complète de la manière dont cet effet varie à travers le monde et selon les différents types de villes et de zones climatiques et dont il évoluera à l'avenir.

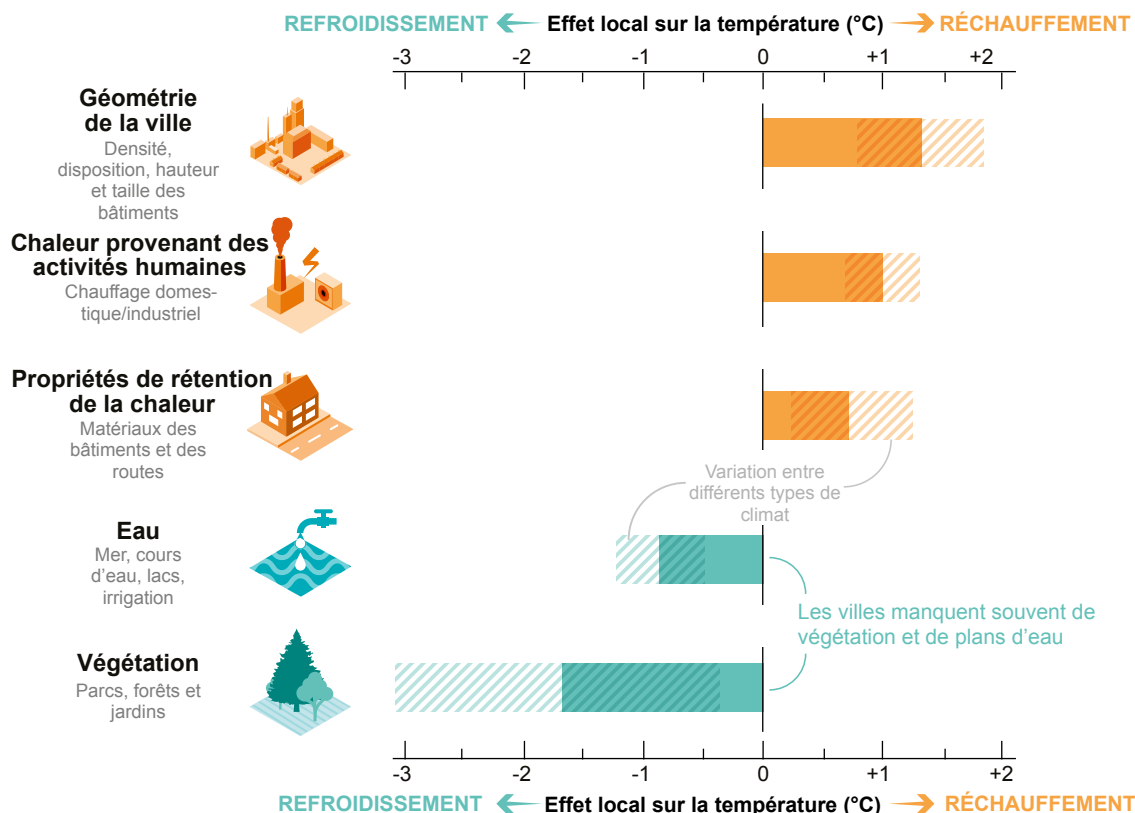
En conséquence, il est difficile d'évaluer quelle sera l'incidence du changement climatique sur l'effet d'îlot de chaleur urbain, et les diverses études ne concordent pas à ce sujet. Deux choses sont cependant très claires. En premier lieu, l'urbanisation future va étendre les zones d'îlots de chaleur urbains, ce qui amplifiera le réchauffement futur dans beaucoup d'endroits du monde. À certains endroits, le réchauffement nocturne produit par l'effet d'îlot de chaleur urbain pourrait même être du même ordre que le réchauffement attendu du changement climatique d'origine humaine. En second lieu, les vagues de chaleur plus intenses, plus longues et plus fréquentes provoquées par le changement climatique toucheront plus durement les villes et leurs habitants, car le réchauffement supplémentaire provenant de l'effet d'îlot de chaleur urbain aggravera les effets du changement climatique.

En bref, les villes sont actuellement des points chauds à l'échelle locale du fait que leur structure, leurs matériaux et leurs activités piègent et libèrent de la chaleur et diminuent les processus de refroidissement naturels. À l'avenir, le changement climatique aura, en moyenne, un effet limité sur l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain en tant que tel, mais l'urbanisation en cours, conjuguée à des vagues de chaleur plus fréquentes, plus longues et plus chaudes, va faire que les villes seront plus exposées au réchauffement planétaire.

FAQ 10.2 (suite)

FAQ 10.2: Pourquoi les villes sont-elles des « points chauds » du réchauffement climatique ?

Les villes sont habituellement plus chaudes que les zones environnantes en raison de facteurs qui piègent et libèrent la chaleur et d'un manque de facteurs naturels rafraîchissants comme les plans d'eau et la végétation.



FAQ 10.2, figure 1 | Efficacité des divers facteurs contribuant à réchauffer ou à refroidir les quartiers des zones urbaines. Dans l'ensemble, les villes ont tendance à être plus chaudes que les zones environnantes. C'est ce qu'on appelle l'effet d'« îlot de chaleur urbain ». Les zones hachurées sur les barres montrent comment l'intensité des effets de réchauffement ou de refroidissement de chaque facteur varie en fonction du climat local. Par exemple, la végétation a un effet de refroidissement plus important dans les climats tempérés et chauds. On trouvera des précisions sur les sources de données dans le tableau de données du chapitre (tableau 10.SM.11).

FAQ

FAQ 11.1 | Quels sont les changements des extrêmes climatiques par rapport aux changements des moyennes climatiques ?

Le changement climatique d'origine humaine modifie la fréquence et l'intensité des variables climatiques (température en surface, par exemple) et des phénomènes (les cyclones tropicaux, par exemple) de diverses manières. Nous savons à présent que la manière dont les conditions moyennes et extrêmes ont changé (et continueront à le faire) dépend de la variable et du phénomène considérés. Les changements des extrêmes locaux de la température en surface suivent de près les changements correspondants des températures locales moyennes en surface. Au contraire, les changements des précipitations extrêmes (fortes précipitations) ne suivent généralement pas ceux des précipitations moyennes et peuvent même évoluer dans la direction opposée (par exemple avec une diminution des précipitations moyennes mais une augmentation des précipitations extrêmes).

Le changement climatique se manifestera de manière très différente selon la région, la saison et la variable considérées. Ainsi, dans certaines régions de l'Arctique, les températures se réchaufferont trois à quatre fois plus rapidement en hiver qu'en été. Et en été, la plus grande partie de l'Europe du Nord connaîtra des hausses de température plus importantes que la plupart des régions du sud-est de l'Amérique du Sud et de l'Australasie, les différences pouvant être supérieures à 1 °C selon le niveau de réchauffement planétaire. En général, les différences entre les régions et les saisons tiennent au fait que les processus physiques qui les sous-tendent sont très différents d'une région et d'une saison à l'autre.

Le changement climatique se manifestera aussi différemment selon les régimes météorologiques, ce qui peut entraîner des changements contrastés entre les conditions moyennes et extrêmes. Les observations du passé récent et les projections des modèles climatiques montrent que, presque partout, les changements des températures quotidiennes sont dominés par un réchauffement général où la moyenne climatologique et les valeurs extrêmes se décalent vers des températures plus élevées, ce qui rend les extrêmes chauds plus fréquents et les extrêmes froids moins fréquents. Les panneaux supérieurs de la figure 1 de la FAQ 11.1 indiquent les projections de changement de la température en surface pour les conditions moyennes à long terme (à gauche) et pour les jours de chaleur extrême (à droite) pendant la saison chaude (la saison d'été aux latitudes moyennes à élevées). Les projections d'augmentation de la température moyenne à long terme diffèrent sensiblement selon les régions, allant de moins de 3 °C dans certains endroits du centre de l'Asie du Sud et du sud de l'Amérique du Sud à plus de 7 °C à certains endroits d'Amérique du Nord, d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Les changements des jours de chaleur extrême suivent d'assez près ceux des conditions moyennes, même si, dans certaines régions, les taux de réchauffement concernant les extrêmes peuvent être intensifiés (Europe du Sud et bassin de l'Amazonie, par exemple) ou affaiblis (Asie du Nord et Groenland, par exemple) par rapport aux valeurs moyennes.

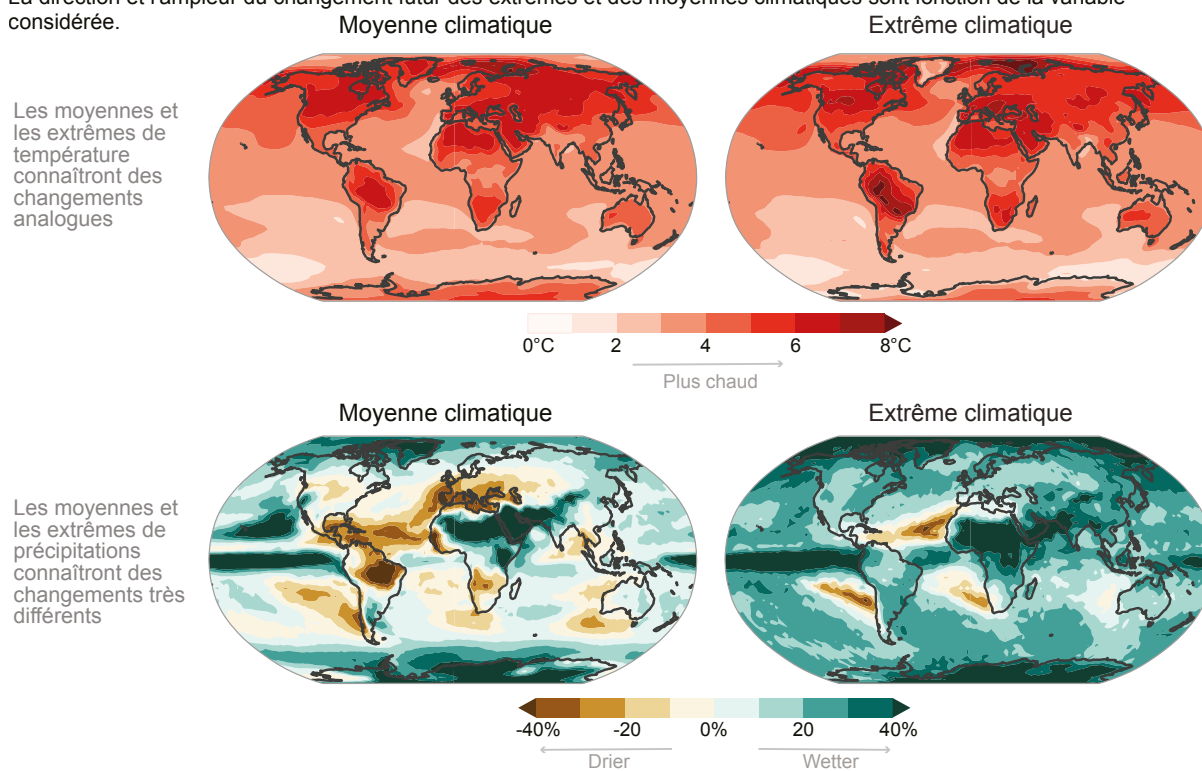
Les observations récentes et les projections des modèles climatiques globaux et régionaux indiquent des changements radicalement différents pour ce qui est des extrêmes de précipitations (compte tenu aussi bien des pluies extrêmes que des chutes de neige extrêmes) par rapport aux précipitations moyennes. Les panneaux inférieurs de la figure 1 de la FAQ 11.1 indiquent les changements projetés pour les précipitations moyennes à long terme (à gauche) et les fortes précipitations (à droite). Les changements des précipitations moyennes présentent des différences frappantes selon les régions, avec un assèchement important dans des régions comme le sud de l'Europe et le nord de l'Amérique du Sud et une humidification dans des régions comme le Moyen-Orient et le sud de l'Amérique du Sud. Les changements des précipitations extrêmes sont beaucoup plus uniformes, avec une augmentation systématique dans pratiquement toutes les régions terrestres. Les raisons physiques qui sous-tendent cette disparité des réponses des précipitations moyennes et des précipitations extrêmes sont désormais bien comprises. L'intensification des précipitations extrêmes est due à l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique (environ 7 % par degré de réchauffement près de la surface), même si elle est modulée par divers changements dynamiques. En revanche, les changements des précipitations moyennes sont déterminés non seulement par l'augmentation de l'humidité, mais aussi par des processus plus lents qui limitent les changements à l'échelle globale à seulement 2 à 3 % par degré de réchauffement près de la surface.

En bref, les relations particulières entre les changements des conditions moyennes et extrêmes dépendent fortement de la variable ou du phénomène considéré. À l'échelle locale, les changements des températures moyennes et extrêmes en surface sont étroitement liés, tandis que les changements des précipitations moyennes et extrêmes ne sont souvent que faiblement reliés. Pour ces deux variables, les changements des conditions moyennes et extrêmes varient fortement d'un endroit à l'autre en raison de l'effet des processus locaux et régionaux.

FAQ 11.1 (suite)

FAQ 11.1: Comment les extrêmes climatiques vont-ils changer par rapport aux changements des moyennes climatiques ?

La direction et l'ampleur du changement futur des extrêmes et des moyennes climatiques sont fonction de la variable considérée.



FAQ 11.1, figure 1 | Cartes mondiales des changements futurs de la température en surface (panneaux supérieurs) et des précipitations (panneaux inférieurs) pour les conditions moyennes à long terme (à gauche) et les conditions extrêmes (à droite). Tous les changements ont été estimés à l'aide de la médiane de l'ensemble des modèles couplés du Projet de comparaison dans sa phase 6 (CMIP6) pour un scénario correspondant à un réchauffement de 4 °C de la planète par rapport aux températures de 1850-1900. Les températures moyennes en surface correspondent à la saison de trois mois la plus chaude (la saison d'été aux latitudes moyennes et élevées) et les températures extrêmes, au jour le plus chaud de l'année. Les changements de précipitations, qui peuvent concerner aussi bien la pluie que la neige, sont normalisés par rapport aux valeurs de 1850-1900 et indiqués en pourcentage ; les précipitations extrêmes renvoient aux précipitations quotidiennes les plus importantes d'une année donnée.

FAQ

FAQ 11.2 | Le changement climatique d'origine humaine va-t-il entraîner l'occurrence d'extrêmes sans précédent ?

Le changement climatique a déjà augmenté l'ampleur et la fréquence des épisodes de chaleur extrême, diminué l'ampleur et la fréquence des épisodes de froid extrême et, dans certaines régions, intensifié les épisodes de précipitations extrêmes. À mesure que le climat s'éloignera de ses états passés et actuels, nous connaîtrons des événements extrêmes sans précédent, que ce soit en matière d'ampleur, de fréquence, du moment de l'année ou de l'endroit où ils se produisent. La fréquence de ces événements extrêmes sans précédent augmentera avec la hausse du niveau de réchauffement planétaire. En outre, l'occurrence combinée de plusieurs événements extrêmes sans précédent pourrait provoquer des impacts considérables et sans précédent.

Le changement climatique d'origine humaine a déjà affecté de nombreux aspects du système climatique. Outre l'augmentation de la température à la surface du globe, de nombreux types d'événements météorologiques et climatiques extrêmes ont changé. Dans la plupart des régions, la fréquence et l'intensité des extrêmes chauds ont augmenté et celles des extrêmes froids ont diminué. La fréquence et l'intensité des fortes précipitations ont augmenté à l'échelle planétaire et dans la majorité des régions terrestres. Si des événements extrêmes comme les vagues de chaleur terrestres et marines, les précipitations extrêmes, la sécheresse, les cyclones tropicaux et les incendies de forêt et les inondations côtières auxquels ils donnent lieu se sont déjà produits par le passé et continueront de se produire à l'avenir, leur ampleur ou leur fréquence sont différentes dans un monde plus chaud. Ainsi, les vagues de chaleur futures dureront plus longtemps et atteindront des températures plus élevées, et les épisodes futurs de précipitations extrêmes seront plus intenses dans plusieurs régions. Certains événements extrêmes comme le froid extrême seront moins intenses et moins fréquents avec l'augmentation du réchauffement.

Des événements extrêmes sans précédent – c'est-à-dire qui n'ont jamais été observés dans le passé – se produiront à l'avenir de cinq façons différentes (FAQ 11.2, figure 1). En premier lieu, des événements considérés comme extrêmes dans le climat actuel se produiront à l'avenir avec une ampleur sans précédent. En deuxième lieu, les événements extrêmes futurs se répèteront aussi avec une fréquence sans précédent. En troisième lieu, certains types d'événements extrêmes pourraient se produire dans des régions qui n'ont jamais connu ce type d'événement auparavant. Ainsi, avec l'élévation du niveau de la mer, des inondations côtières pourraient se produire à des endroits où il n'y en a jamais eu, et des incendies de forêt se produisent déjà dans des régions, notamment dans l'Arctique, où la probabilité de tels événements était faible auparavant. En quatrième lieu, les événements extrêmes pourraient aussi être sans précédent du point de vue du moment de leur occurrence. Des températures extrêmement chaudes pourraient ainsi survenir plus tôt ou plus tard dans l'année que par le passé.

Enfin, les événements extrêmes composites (lorsque plusieurs événements extrêmes de types différents ou similaires se produisent simultanément et/ou successivement) pourraient être plus probables ou plus sévères à l'avenir. Les événements composites peuvent souvent avoir un impact plus fort sur les écosystèmes et les sociétés que lorsque de tels événements se produisent indépendamment. Ainsi, une sécheresse accompagnée d'une chaleur extrême augmentera le risque de feux de friches et de dégâts ou de pertes agricoles. Comme les événements extrêmes individuels s'aggravent en raison du changement climatique, l'occurrence combinée de ces événements va donner lieu à des événements composites sans précédent. Cela pourrait exacerber l'intensité de ces événements extrêmes et les impacts qui leur sont associés.

FAQ 11.2 (suite)

FAQ 11.2: Le changement climatique va-t-il entraîner l'occurrence d'extrêmes sans précédent ?

Oui, dans un climat qui change, les événements extrêmes peuvent être sans précédent lorsqu'ils...



sont d'une plus grande ampleur



se produisent avec une fréquence accrue



surviennent à de nouveaux endroits



se produisent à un moment de l'année différent



se combinent de nouvelles façons
(événements composites)

Des événements extrêmes sans précédent se sont déjà produits au cours de ces dernières années, par rapport au climat du XXe siècle. Certains événements récents de chaleur extrême auraient eu très peu de chances de se produire sans l'influence humaine sur le climat (voir FAQ 11.3). À l'avenir, des événements extrêmes sans précédent se produiront à mesure que le climat va continuer à se réchauffer. Ces événements se produiront avec des amplitudes et des fréquences plus importantes qu'auparavant. Il se peut aussi qu'ils se manifestent à de nouveaux endroits, à de nouvelles périodes de l'année ou sous la forme d'événements composites sans précédent. En outre, les événements sans précédent deviendront d'autant plus fréquents que le niveau de réchauffement sera plus élevé (3 °C au lieu de 2 °C de réchauffement planétaire, par exemple).

FAQ 11.2, figure 1 | Nouveaux types d'événements extrêmes sans précédent qui se produiront en raison du changement climatique.

FAQ 11.3 - Le changement climatique est-il la cause de cet événement extrême survenu récemment dans mon pays ?

Si les causes exactes de tel ou tel événement extrême sont difficiles à déterminer, la science relativement récente de l'attribution des événements est capable de quantifier le rôle du changement climatique dans la modification de la probabilité et de l'ampleur de certains types d'événements météorologiques et climatiques extrêmes. Il existe des preuves solides que les caractéristiques de nombreux événements extrêmes individuels ont déjà changé en raison des modifications du système climatique dues aux activités humaines. Certains types d'événements météorologiques extrêmes à fort impact se sont produits plus souvent et sont devenus plus sévères en raison de ces influences humaines. A mesure que le climat continue de se réchauffer, les changements observés dans la probabilité et/ou l'ampleur de certains événements météorologiques extrêmes se poursuivront puisque les influences humaines sur ces événements augmentent.

On se demande souvent si le changement climatique dû aux activités humaines est à l'origine de telle ou telle catastrophe majeure liée à des événements météorologiques et climatiques. Lorsque des événements météorologiques et climatiques extrêmes se produisent, l'exposition et la vulnérabilité jouent un rôle important dans la détermination de l'ampleur et des impacts de la catastrophe qui en résulte. Il est donc difficile d'attribuer directement une catastrophe précise au changement climatique. Cependant, la science relativement nouvelle de l'attribution des événements permet aux scientifiques d'attribuer des aspects de certains événements climatiques et météorologiques extrêmes à certaines causes. Les scientifiques ne peuvent pas répondre directement à la question de savoir si tel ou tel événement a été causé par le changement climatique, car les événements extrêmes se produisent naturellement, et tout événement météorologique et climatique particulier résulte d'un ensemble complexe de facteurs humains et naturels. En revanche, les scientifiques quantifient l'importance relative des influences humaines et naturelles sur l'ampleur et/ou la probabilité de certains événements météorologiques extrêmes. Ces informations sont importantes pour la planification de la réduction des risques de catastrophe, car une meilleure connaissance de l'évolution de la probabilité et de l'ampleur des événements extrêmes importants permet de mieux quantifier les risques de catastrophe.

Au cas par cas, les scientifiques peuvent désormais quantifier la contribution des influences humaines à l'ampleur et à la probabilité de nombreux événements extrêmes. Pour ce faire, ils estiment et comparent la probabilité ou l'ampleur du même type d'événement entre le climat actuel – compte tenu de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et des autres influences humaines – et un monde alternatif où les gaz à effet de serre dans l'atmosphère seraient restés à leurs niveaux préindustriels. La figure 1 de la FAQ 11.3 illustre cette méthode en prenant comme exemple les différences de température et de probabilité entre les deux scénarios. Aussi bien le climat de l'époque préindustrielle (en bleu) que celui de l'époque actuelle (rouge) connaissent des événements extrêmes chauds, mais avec des probabilités et des amplitudes différentes. Les extrêmes chauds correspondant à une température donnée ont plus de chance de se produire dans le climat plus chaud de l'époque actuelle que dans le climat plus frais de l'époque préindustrielle. En outre, un événement extrême chaud correspondant à une probabilité donnée sera plus chaud dans le climat de l'époque actuelle que dans celui de l'époque préindustrielle. Les simulations de modèles climatiques sont souvent utilisées pour estimer l'occurrence d'un type spécifique d'événement dans les deux climats. Le changement d'ampleur et/ou de probabilité de l'événement extrême dans le climat de l'époque actuelle par rapport à celui de l'époque préindustrielle est attribué à la différence entre les deux scénarios, qui est l'influence humaine.

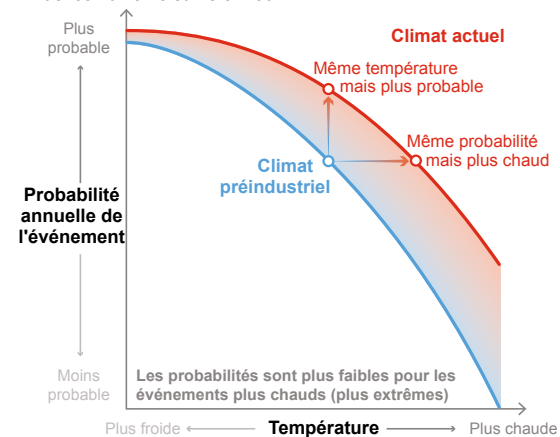
Pour de nombreux extrêmes chauds, des augmentations de leur probabilité et de leur ampleur ont été considérées de manière cohérente comme attribuables (à l'influence humaine). Des augmentations attribuables à l'influence humaine ont également été constatées pour certains événements de précipitations extrêmes, y compris pour des événements associés à des ouragans, mais les résultats peuvent varier selon les événements. Dans certains cas, l'importance des variations naturelles du système climatique empêche d'attribuer le changement de probabilité ou d'ampleur de tel ou tel événement extrême à l'influence humaine. En outre, l'attribution de certaines catégories d'événements météorologiques extrêmes (comme les tornades) dépasse les capacités actuelles de modélisation et de compréhension théorique. A mesure que le climat continue à se réchauffer, on s'attend à des changements plus importants en matière de probabilité et d'ampleur, et il sera donc possible d'attribuer les extrêmes futurs de température et de précipitation à l'influence humaine dans de nombreux endroits. Des changements attribuables pourraient apparaître pour d'autres types d'extrêmes à mesure que le signal de réchauffement augmentera.

FAQ 11.3 (suite)

En conclusion, le réchauffement planétaire d'origine humaine a entraîné des changements constatés dans une large gamme d'événements météorologiques extrêmes récents. Pour un grand nombre de vagues de chaleur et d'extrêmes chauds qui se sont produits dans le monde, de fortes augmentations de leur probabilité et de leur ampleur ont été constatées et sont attribuables à l'influence humaine.

FAQ 11.3: changement climatique et événements extrêmes

Les événements extrêmes sont devenus plus probables et plus intenses. Beaucoup de ces changements peuvent être attribués à l'influence humaine sur le climat.



FAQ 11.3, figure 1 | Les changements climatiques entraînent des changements dans l'ampleur et la probabilité des événements extrêmes.

Exemple illustrant en quoi les extrêmes de température diffèrent entre un climat avec le niveau préindustriel de gaz à effet de serre (en bleu) et le climat actuel (en orange) pour une région représentative. L'axe horizontal indique la fourchette des températures extrêmes, et l'axe vertical la probabilité annuelle de l'occurrence de chaque événement de température. Plus on se déplace vers la droite, plus les extrêmes sont chauds ainsi que rares (moins probables). Pour les extrêmes chauds, un événement extrême qui s'est produit à une certaine température dans le climat de l'époque préindustrielle serait plus probable (flèche verticale) dans le climat de l'époque actuelle. Un événement qui avait une certaine probabilité dans le climat de l'époque préindustrielle serait plus chaud (flèche horizontale) dans le climat de l'époque actuelle. Si le climat a connu un certain nombre d'extrêmes de température lorsque les concentrations de gaz à effet de serre étaient à leur niveau préindustriel, de tels événements sont plus chauds et plus fréquents dans le climat actuel.

FAQ 12.1 | Qu'est-ce qu'un facteur climatique générateur d'impact (CID) ?

Un facteur climatique générateur d'impact est une condition physique du système climatique qui a des répercussions directes sur la société ou les écosystèmes. Ces facteurs peuvent représenter une condition moyenne à long terme (comme les températures hivernales moyennes qui affectent les besoins en chauffage intérieur, par exemple), un événement courant (un épisode de gel qui tue les plantes de saison chaude, par exemple) ou un événement extrême (comme une inondation côtière qui détruit des habitations). Un seul facteur climatique générateur d'impact peut être préjudiciable pour une partie de la société tout en étant bénéfique à une autre, ou n'avoir aucune incidence pour d'autres parties de la société. Un facteur climatique générateur d'impact (ou sa modification résultant du changement climatique) n'est donc pas systématiquement dangereux ou bénéfique, mais nous le qualifions d'« aléa » quand les experts établissent qu'il est préjudiciable à un système spécifique.

Le changement climatique peut modifier de nombreux aspects du système climatique, mais les efforts visant à identifier les impacts et les risques se concentrent généralement sur un ensemble plus restreint de changements connus pour affecter, ou potentiellement affecter, certaines choses auxquelles la société tient. Ces facteurs climatiques générateurs d'impact (CID) sont définis formellement dans le présent rapport comme des « conditions physiques du système climatique (moyennes, événements, extrêmes, etc.) qui ont une incidence sur un élément de la société ou des écosystèmes. Selon la tolérance de chaque système, ces facteurs et leurs changements peuvent avoir un caractère préjudiciable, bénéfique, neutre ou un mélange de ces aspects sur l'ensemble des éléments de ce système et des régions qui sont en interaction ». Parce que les personnes, les infrastructures et les écosystèmes interagissent directement avec leur environnement immédiat, les experts du climat évaluent les CID à l'échelle locale et régionale. Les CID peuvent avoir trait à la température, au cycle de l'eau, au vent et aux tempêtes, à la neige et à la glace, aux processus océaniques et côtiers ou à leur chimie et au bilan énergétique du système climatique. Les impacts et risques futurs peuvent aussi être directement influencés par des facteurs indépendants du climat (comme le développement socioéconomique, la croissance démographique ou une épidémie virale) qui peuvent également modifier la vulnérabilité ou l'exposition des systèmes.

Les CID tiennent compte des caractéristiques importantes du climat moyen et des événements courants et extrêmes qui façonnent la société et la nature (voir FAQ 12.2). Certains CID se concentrent sur des aspects du climat moyen (comme la progression saisonnière des températures et des précipitations, les vents moyens ou la chimie de l'océan) qui déterminent, par exemple, la répartition des espèces, les systèmes agricoles, l'emplacement des stations touristiques, la disponibilité des ressources en eau et les besoins attendus au cours d'une année moyenne en matière de chauffage et de refroidissement des bâtiments. Les CID incluent aussi des épisodes courants qui sont particulièrement importants pour les systèmes, comme les dégels à même de déclencher le développement de la végétation au printemps, les vagues de froid qui sont importantes pour les besoins de refroidissement des cultures fruitières ou les gelées qui éliminent la végétation estivale quand l'hiver s'installe. Enfin, les CID incluent de nombreux événements extrêmes associés à des impacts, comme les tempêtes de grêle qui endommagent les véhicules, les inondations côtières qui détruisent des biens sur le littoral, les tornades qui endommagent les infrastructures, les sécheresses qui intensifient la concurrence pour les ressources en eau et les vagues de chaleur qui mettent en danger la santé des travailleurs en extérieur.

De nombreux aspects de notre vie quotidienne, de nos activités économiques et de nos systèmes naturels dépendent de la météorologie et du climat, et il y a un fort intérêt à pouvoir anticiper les effets du changement climatique sur ce qui est important pour nous. Pour répondre à ces besoins, les scientifiques s'engagent avec les entreprises et les autorités publiques pour fournir des services climatiques, c'est-à-dire des informations climatiques utiles et pouvant être exploitables concrètement, conçues pour aider à la prise de décisions. Les sciences du climat et les services climatiques peuvent mettre l'accent sur les CID qui perturbent considérablement les systèmes pour appuyer des approches plus générales de la gestion des risques. Un même changement d'un CID peut avoir des répercussions complètement différentes selon les secteurs, voire les éléments d'un même secteur, de sorte que le dialogue entre les climatologues et les parties prenantes est important pour contextualiser les changements climatiques à venir. Les services climatiques qui visent à répondre aux besoins de planification et d'optimisation d'une activité peuvent être davantage axés sur les changements plus graduels des conditions climatiques dans lesquelles cette activité est menée.

La figure 1 de la FAQ 12.1 présente des exemples de conséquences de changements du manteau neigeux saisonnier permettant de faire le lien entre les sciences du climat et les besoins en matière d'atténuation, d'adaptation et

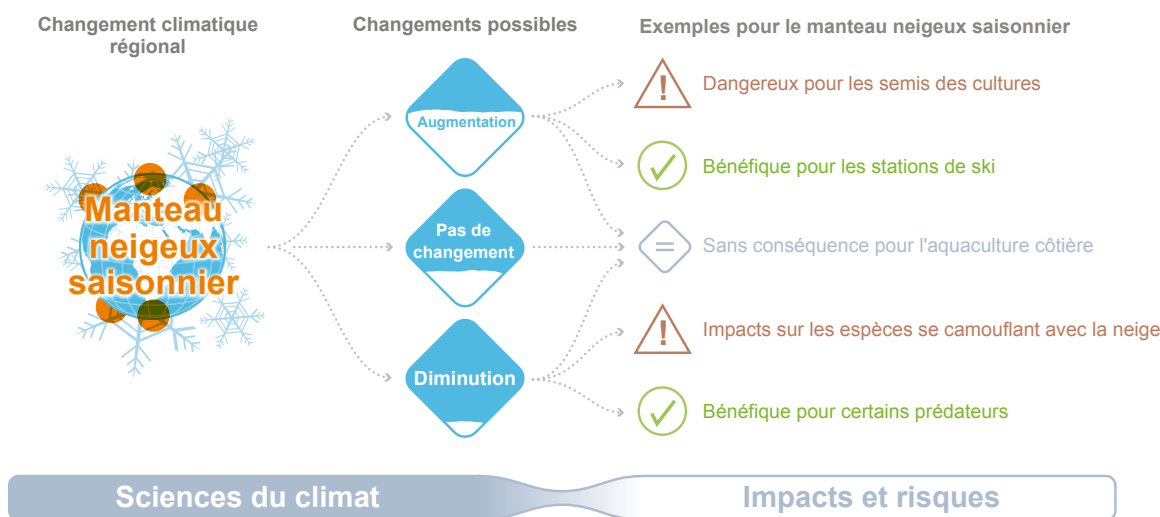
FAQ 12.1 (suite)

de gestion des risques régionaux. La durée de la saison de présence de neige au sol n'est qu'une des nombreuses conditions du système climatique régional susceptibles de changer à l'avenir et devient un CID du fait que beaucoup d'éléments de la société et des écosystèmes reposent sur une saisonnalité attendue du manteau neigeux. Les climatologues et les fournisseurs de services climatiques qui étudient le changement climatique d'origine humaine peuvent identifier différentes régions où la durée du manteau neigeux saisonnier pourrait augmenter, diminuer ou rester plus ou moins identique. Dans chaque région, le changement du manteau neigeux saisonnier peut avoir des effets bénéfiques ou préjudiciables sur différents systèmes (dans le second cas, ce changement constituerait un « aléa »), même si des systèmes comme l'aquaculture côtière sont relativement épargnés. L'évolution du profil des retombées bénéfiques et des aléas liés à ces changements du CID du manteau neigeux saisonnier affecte le profil des impacts, des risques et des bénéfices avec lesquels les parties prenantes régionales devront composer en réponse au changement climatique.

FAQ 12.1: Qu'est-ce qu'un facteur climatique générateur d'impact (CID)?

Un facteur climatique générateur d'impact (CID) est une condition du système climatique qui a des répercussions directes sur certains éléments de la société ou des écosystèmes. Ces facteurs et leurs changements peuvent provoquer des effets positifs, négatifs ou nuls (ou des effets mixtes).

Facteur climatique générateur d'impact Impacts sur les sociétés et les écosystèmes



FAQ 12.1, figure 1 | Un même facteur climatique générateur d'impact peut affecter les écosystèmes et la société de différentes manières. Cette variété d'impacts résultant du changement d'un même facteur climatique générateur d'impact est illustrée par l'exemple du manteau neigeux saisonnier régional.

FAQ

FAQ 12.2 | Que sont les seuils climatiques, et pourquoi sont-ils importants ?

Les seuils climatiques renseignent sur la tolérance de la société et des écosystèmes, ce qui nous permet de mieux examiner les types de changement climatique susceptibles d'avoir des impacts sur les choses qui nous importent. De nombreux systèmes ont des seuils naturels ou structurels. Si les conditions excèdent ces seuils, il peut en résulter des changements soudains, voire un effondrement, en ce qui concerne la santé, la productivité, la fonctionnalité ou le comportement. Les efforts d'adaptation et de gestion des risques peuvent modifier ces seuils, en changeant le profil des conditions climatiques qui seraient problématiques et en augmentant la résilience globale du système.

Les décideurs observent depuis longtemps que certaines conditions météorologiques et climatiques peuvent être problématiques, voire dangereuses, pour les choses qui leur importent (autrement dit l'ensemble des choses qui ont une valeur socioéconomique, culturelle ou intrinsèque). De nombreux éléments de la société et des écosystèmes opèrent dans une zone climatique appropriée, sélectionnée naturellement ou par les parties prenantes en fonction des conditions climatiques attendues. Néanmoins, quand le changement climatique fait évoluer ces conditions au-delà des gammes attendues, celles-ci peuvent franchir un « seuil » climatique, niveau au-delà duquel on assiste soit à un changement progressif du comportement du système, soit à des effets abrupts, non linéaires et potentiellement irréversibles.

Les seuils climatiques peuvent être associés à des niveaux de tolérance soit naturels, soit structurels. Les seuils naturels comprennent, par exemple, les conditions de chaleur et d'humidité au-delà desquelles l'être humain ne peut pas réguler sa température interne par la transpiration, les durées de sécheresse qui accentuent la compétition entre les espèces et les températures hivernales qui sont mortelles pour les parasites ou les espèces vectrices de maladies. Les seuils structurels comprennent les limites techniques des systèmes de drainage, les vitesses de vent extrêmes qui limitent le fonctionnement des éoliennes, la hauteur des infrastructures de protection du littoral et l'emplacement des infrastructures d'irrigation ou des abris anticycloniques.

Les seuils peuvent être définis en fonction de valeurs brutes (comme une température maximum dépassant 35 °C) ou de percentiles (comme le total des précipitations quotidiennes du 99e percentile à l'échelle locale). Ils dépendent souvent fortement des saisons (voir FAQ 12.3). Par exemple, la quantité de neige à laquelle un arbre à feuilles caduques peut résister dépend du moment où cette neige tombe, avant ou après la chute de ses feuilles. La réaction de la plupart des systèmes aux changements est complexe et n'est pas déterminée uniquement ou exactement par les seuils précis d'une seule variable climatique. Les seuils peuvent néanmoins être des indicateurs utiles du comportement des systèmes, et leur compréhension peut contribuer à éclairer les décisions de gestion des risques.

La figure 1 de la FAQ 12.2 illustre comment les conditions de seuil peuvent nous aider à comprendre les conditions climatiques qui se prêtent à un fonctionnement normal du système et les seuils au-delà desquels des impacts se produisent. Les cultures croissent le plus souvent de manière optimale dans une fourchette adaptée de températures quotidiennes, influencée par les variétés cultivées et la façon dont l'exploitation est gérée. Quand les températures quotidiennes dépassent un seuil de température « critique », les végétaux commencent à subir un stress thermique qui réduit leur croissance et peut entraîner une diminution des rendements. Si les températures atteignent un seuil de température « limite » plus élevé, les cultures peuvent subir une perte des feuilles, une stérilité du pollen ou des lésions des tissus qui peuvent faire perdre la récolte. Les agriculteurs sélectionnent généralement un système de culture en tenant compte de la probabilité d'événements de température extrême pouvant survenir au cours d'une saison type. L'identification des seuils de chaleur aide donc les agriculteurs à choisir leurs stratégies de gestion des semences et des cultures dans le cadre de leur gestion globale des risques. Les spécialistes du climat peuvent par conséquent avoir pour objectif d'aider à la planification des exploitations agricoles en fournissant des informations sur les changements induits par le changement climatique en ce qui concerne la fréquence attendue à laquelle les extrêmes chauds quotidiens excèdent les seuils de tolérance des cultures.

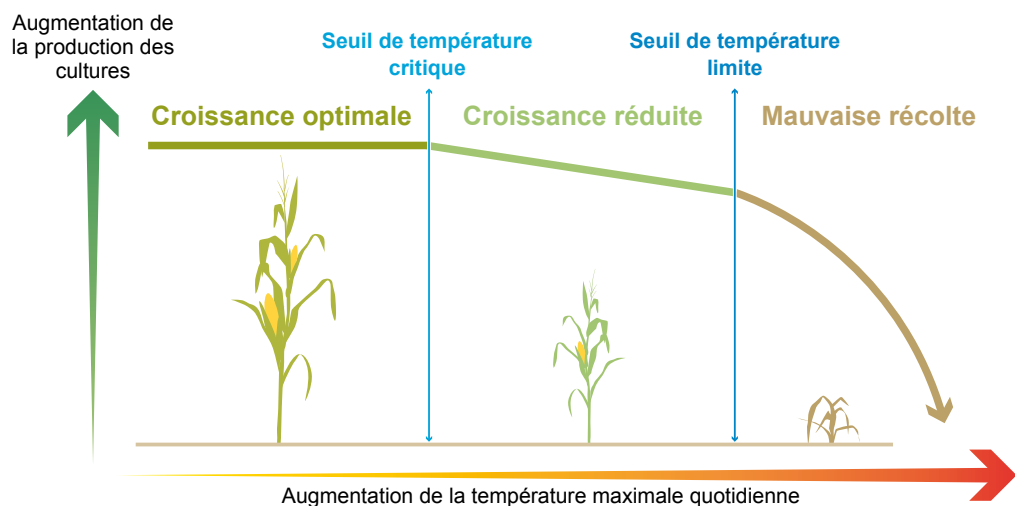
L'adaptation et d'autres changements dans les sociétés et l'environnement peuvent déplacer les seuils climatiques en modifiant la vulnérabilité et l'exposition. Ainsi, parmi les efforts d'adaptation, il est possible de sélectionner de nouvelles cultures dont les niveaux de tolérance à la chaleur sont plus élevés, de façon que les seuils dangereux correspondants soient moins fréquents. De même, surélever une digue protégeant une population donnée peut augmenter le niveau de débit fluvial qui peut être toléré sans inondation et ainsi réduire la fréquence des inondations préjudiciables. Les parties prenantes bénéficient donc de services climatiques issus d'un processus de codéveloppement, les scientifiques identifiant les seuils pertinents pour le système et définissant des indices sur

FAQ 12.2 (suite)

mesure de facteurs générateurs d'impact climatique correspondant à ces seuils (FAQ 12.1). Les seuils en question aident à cibler l'élaboration d'informations climatiques pertinentes pour l'adaptation et la gestion des risques.

FAQ 12.2: Que sont les seuils climatiques, et pourquoi sont-ils importants?

Les systèmes sont souvent caractérisés par des seuils qui peuvent entraîner des changements soudains, quand les conditions climatiques dépassent ces seuils. Les efforts d'adaptation et de gestion des risques peuvent accroître la résilience globale du système en identifiant et en modifiant les seuils de tolérance.



FAQ 12.2, figure 1 | Réponse des cultures aux seuils de température maximale. Le taux de croissance des cultures répond à l'augmentation des températures quotidiennes maximales, ce qui entraîne une réduction de la croissance ou une perte de récolte selon que la température dépasse son seuil critique ou son seuil limite, respectivement. On notera que des changements d'autres facteurs environnementaux (dont le dioxyde de carbone et l'eau) peuvent augmenter la tolérance des plantes à l'élévation des températures.

FAQ 12.3 | Comment le changement climatique va-t-il affecter les caractéristiques régionales d'un aléa climatique ?

Le changement climatique d'origine humaine peut modifier les caractéristiques régionales d'un aléa climatique en changeant l'ampleur ou l'intensité de cet aléa, la fréquence à laquelle il se produit, la durée pendant laquelle les conditions dangereuses persistent, le moment où l'aléa se produit ou l'étendue spatiale menacée par l'aléa. En examinant chacun de ces aspects du changement de profil d'un aléa, les services climatiques peuvent fournir des informations sur les risques climatiques qui permettent aux décideurs de mieux concevoir les stratégies d'adaptation, d'atténuation et de gestion des risques.

Un *aléa climatique* est une condition climatique susceptible de porter préjudice aux systèmes naturels ou à la société. Les vagues de chaleur, les sécheresses, les fortes chutes de neige et l'élévation du niveau de la mer en sont des exemples. Les climatologues recherchent des tendances dans les facteurs climatiques générateurs d'impact pour détecter la signature d'un changement des aléas susceptible d'influencer les mesures de planification des parties prenantes (FAQ 12.1). Les fournisseurs de services climatiques coopèrent avec les parties prenantes et les spécialistes des impacts pour dégager les réponses du système et les seuils de tolérance essentiels (FAQ 12.2) et analysent ensuite les observations historiques et les projections du climat futur pour mettre en évidence les changements relatifs aux caractéristiques du profil régional d'un aléa. Le changement climatique peut modifier au moins cinq caractéristiques différentes du profil des aléas d'une région (FAQ 12.3, figure 1) :

L'ampleur ou l'intensité est la valeur brute d'un aléa climatique, telle qu'une augmentation de la température maximale annuelle ou de la hauteur des inondations provoquées par une tempête côtière ayant 1 % de chances de se produire chaque année.

La *fréquence* est le nombre de fois qu'un aléa climatique atteint ou dépasse un seuil pendant une période donnée, à titre d'exemple une augmentation du nombre de fortes chutes de neige, de tornades ou d'inondations au cours d'une année ou d'une décennie.

La *durée* est le temps pendant lequel les conditions dangereuses persistent au-delà du seuil considéré, à titre d'exemple l'augmentation du nombre de jours consécutifs où la température maximale de l'atmosphère dépasse 35 °C, le nombre de mois consécutifs de sécheresse ou le nombre de jours où un cyclone tropical s'abat sur un endroit.

Le *calendrier d'occurrence* décrit l'occurrence d'un aléa à l'échelle d'une journée, d'une saison, d'une année ou d'une autre période d'évolution ou d'interdépendance de certains éléments sectoriels (comme la période de l'année où les animaux migrateurs s'attendent à trouver une source d'alimentation saisonnière). On mentionnera par exemple le décalage vers une occurrence plus précoce du dernier épisode de gel de printemps, le report de la date d'arrivée habituelle des premières pluies saisonnières, la durée de la période de l'hiver où le sol est habituellement enneigé ou la réduction du temps que l'humidité du sol prend habituellement à passer d'un état normal à un état de sécheresse.

L'étendue spatiale est la région dans laquelle une condition d'aléa est attendue, comme la zone actuellement menacée par les cyclones tropicaux, les zones géographiques où le jour le plus froid de l'année limite tel ou tel ravageur ou pathogène, les terres où le pergélisol est présent, la zone qui serait inondée à la suite d'une tempête commune, les zones où les conditions climatiques permettent le travail en extérieur ou l'ampleur d'une vague de chaleur marine.

Les changements du profil d'un aléa sont souvent imbriqués ou découlent des changements physiques qui interviennent dans les aspects correspondants du système climatique. Ainsi, les changements concernant la fréquence et l'ampleur des phénomènes extrêmes sont souvent directement liés entre eux en raison de la dynamique atmosphérique et des processus chimiques. Dans bien des cas, un aspect du changement d'aléa est plus manifeste que les autres et donne un signal avant-coureur d'un ensemble plus vaste de changements qui se profile (FAQ 1.2).

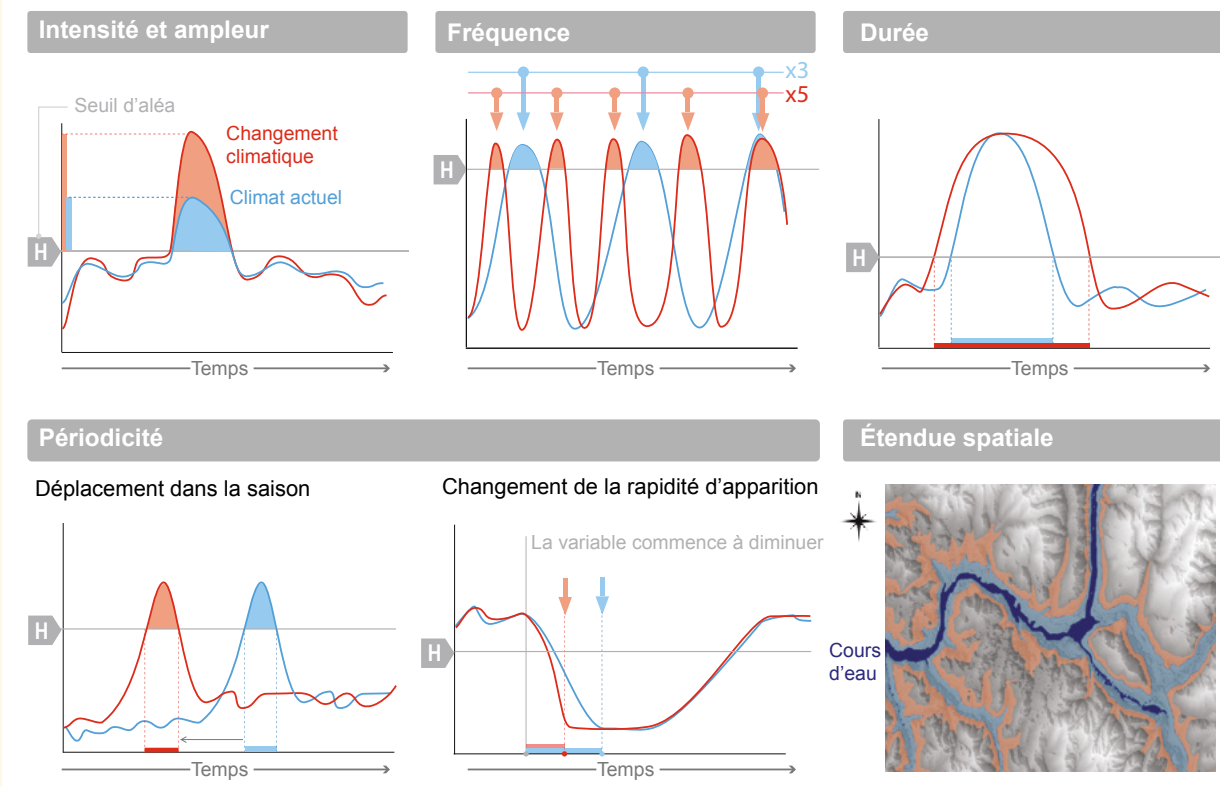
Les informations sur la manière dont un aléa a changé ou va changer aident les parties prenantes à établir des priorités pour des stratégies plus solides en matière d'adaptation, d'atténuation et de gestion des risques. À titre d'exemple, l'allocation de ressources limitées pour les secours en cas de catastrophe peut être conçue pour tenir compte de l'intensification projetée des cyclones tropicaux, même si la fréquence de ces tempêtes ne change pas. La planification peut aussi tenir compte du fait que, même si les vagues de chaleur ne battent pas des records d'intensité, elles peuvent devenir problématiques pour les populations vulnérables quand elles persistent longtemps.

FAQ 12.3 (suite)

De même, les pompiers sont conscients des nouveaux défis logistiques que représentent l’allongement de la saison propice aux incendies et son extension dans des régions du monde où les incendies n’étaient pas auparavant un problème majeur. Un engagement soutenu entre les climatologues et les parties prenantes aide donc les services climatiques à adapter leur message et à communiquer des informations claires sur les types de changement des profils d’aléas climatiques dont il faut tenir compte dans les efforts de résilience.

FAQ 12.3: Quels seront les effets du changement climatique sur les aléas climatiques?

Le changement climatique peut modifier l'intensité et l'ampleur, la fréquence, la durée, le moment d'occurrence dans l'année et l'étendue spatiale des aléas climatiques de chaque région.



FAQ 12.3, figure 1 | Types de changements des profils d’aléas pour une région. Les cinq premiers panneaux illustrent en quoi le changement climatique peut modifier l’intensité (ou l’ampleur), la fréquence, la durée et la périodicité (selon la saisonnalité et la rapidité d’apparition) d’un aléa par rapport à un seuil de risque (ligne grise horizontale, marquée « H »). La différence entre le climat historique (en bleu) et le climat futur (en rouge) indique l’évolution des aspects du changement climatique que les parties prenantes devront gérer. Le panneau inférieur droit illustre l’éventualité qu’un aléa climatique donné (par exemple une crue fluviale centennale actuelle, étendue géographique en bleu) puisse atteindre de nouvelles zones géographiques dans le cadre d’un changement futur du climat (zone étendue en rouge).

FAQ