
Série d'ouvrages sur les changements climatiques

CHAPITRE 1 - LE CLIMAT ET SES PERTURBATIONS

Analyse et rédaction

Mathieu LeBlanc
Xavier Mercier-Méthé
Service de la recherche

Recherche documentaire

Simon Mayer
Service de la référence

Traitement graphique des illustrations

Marie-Claude Chabot-Fradette
Direction des Communications

20 octobre 2021

Les changements climatiques constituent l'un des principaux défis du XXI^e siècle. Les connaissances scientifiques sur le climat terrestre, sur l'effet de l'action humaine dans son évolution et, à l'inverse, sur les conséquences des perturbations climatiques sur nos sociétés s'affinent constamment. Devant la masse imposante d'information disponible et le flot incessant de nouvelles publications, responsables politiques, citoyennes et citoyens s'y perdent facilement. La Bibliothèque de l'Assemblée nationale vous propose une série de notes synthétiques expliquant les principaux aspects de cet enjeu de fond planétaire.

Dans le premier chapitre de cette série, nous tâcherons d'abord de définir la notion de climat et de cerner les principaux facteurs, naturels et anthropiques¹, qui l'influencent. Nous esquisserons ensuite un portrait des gaz à effet de serre (GES) présents dans l'atmosphère et dresserons un bilan mondial de leurs émissions. Dans un troisième temps, nous ferons un tour d'horizon des principaux changements du climat observés à ce jour dans le monde. Puis, nous démystifierons la modélisation climatique afin de présenter brièvement les scénarios d'émissions de GES et les projections climatiques utilisées pour prévoir le climat futur. Pour terminer, nous explorerons les répercussions actuelles et anticipées des changements climatiques sur les aspects physique et biologique de notre environnement.

Note au lecteur : Conformément à ses lignes directrices concernant l'utilisation d'œuvres protégées par le droit d'auteur, le blogue Première lecture privilégie l'utilisation de sources institutionnelles, ou dont la reproduction est autorisée gratuitement. À défaut d'illustrations équivalentes accessibles en français, plusieurs figures présentées contiennent des informations en anglais.

¹ Causés par l'activité humaine.

INTRODUCTION

Les changements climatiques ont fait couler beaucoup d'encre au cours des dernières décennies. Schématiquement résumées, trois attitudes se dégagent généralement de cette problématique. Pour les plus alarmistes, il est déjà trop tard pour sauver l'humanité des bouleversements de notre environnement. À l'opposé, les climatosceptiques s'obstinent à nier l'existence des changements climatiques ou, du moins, en rejettent la responsabilité de l'Homme. Entre ces deux extrêmes, bien des gens tentent souvent tant bien que mal de fournir leur part d'efforts pour l'environnement, malgré une compréhension plus ou moins éclairée des principes scientifiques qui sous-tendent les changements climatiques. Cette incompréhension s'explique, entre autres, par l'absence de manifestations tangibles des changements climatiques dans le quotidien des gens. Si les scientifiques, à travers leurs études et leurs analyses, observent déjà des perturbations du climat et plusieurs conséquences sur les êtres humains et leur environnement tout autour du globe, ces témoignages des changements climatiques ne sont pas toujours perceptibles par le grand public. En se fondant sur leurs modèles, souvent compliqués à comprendre par le commun des mortels, ces mêmes scientifiques prévoient que la gravité des changements climatiques qui surviendront au cours du 21^e siècle dépendra de l'effort de lutte qui y sera consenti.

1.1 CLIMAT

Météo et climat

On confond souvent la « météo » avec le « climat ». Or, ces deux notions ne sont pas interchangeables : elles renvoient à des concepts reliés, mais distincts.

La météo fait référence à l'état quotidien de l'atmosphère et à ses variations à court terme (minutes, jours, semaines). C'est le temps qu'il fait en un endroit donné. On parle généralement de la météo comme d'une combinaison, entre autres, de la température, des précipitations, du taux d'humidité, de la couverture nuageuse et de la vitesse des vents.

Le climat, quant à lui, décrit ce que représente en moyenne la météo d'un endroit sur une longue période (plusieurs dizaines d'années et plus). Le climat peut être, bien sûr, mesuré en considérant la planète entière comme un seul lieu, décrivant ainsi l'état de l'atmosphère tout autour du globe dans son ensemble et ses variations à long terme.

Qu'est-ce qui influence le climat?

Plusieurs facteurs affectent le climat, dans une dynamique complexe, que ce soit à l'échelle planétaire ou locale. Certains de ces facteurs influencent le climat sur le long terme (milliers d'années), alors que d'autres agissent plutôt sur le court terme (dizaines à centaines d'années). Loin d'être exhaustive, cette section présente quelques-uns de ces facteurs ayant un effet considérable sur le climat et son évolution.

Énergie du Soleil et courants atmosphériques

Le moteur même de la machine climatique est l'apport d'énergie solaire à la surface de la Terre. Naturellement, la quantité de chaleur reçue n'est pas égale à travers le globe. En effet, l'angle d'incidence du rayonnement solaire n'est pas le même partout en raison de la forme sphérique de la planète, ce qui fait en sorte que les régions de l'équateur reçoivent davantage de chaleur que les régions des pôles. La dynamique climatique cherchant un certain état d'équilibre, le surplus de chaleur des régions équatoriales est transporté vers les régions des hautes latitudes, surtout par les courants atmosphériques. Il y a donc un mouvement d'ensemble de chaleur de l'équateur vers les pôles.

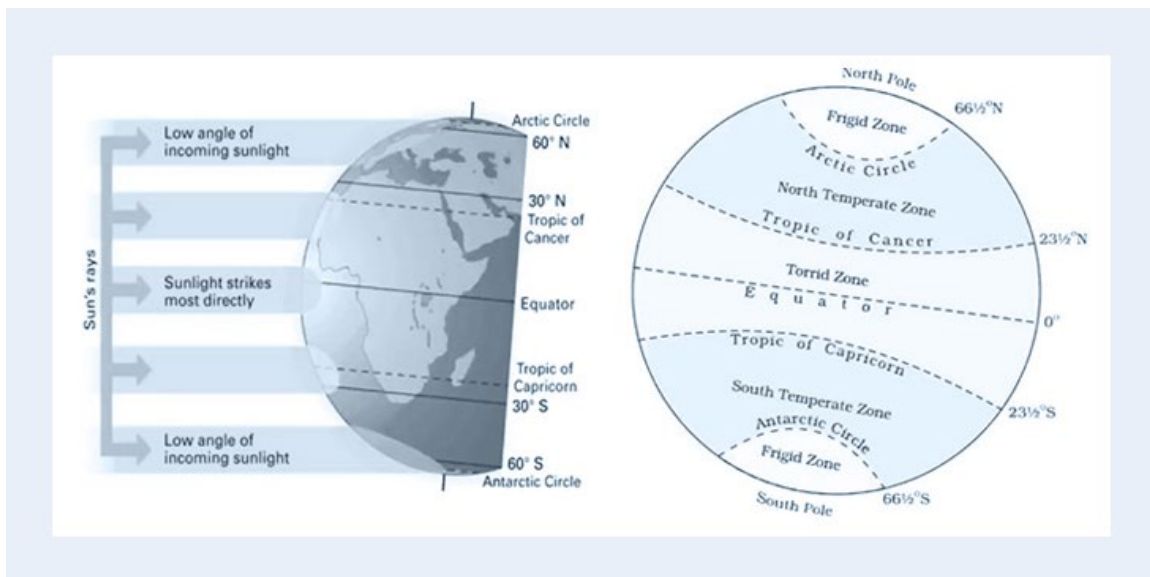


Figure 1. Représentation de l'effet de l'angle d'incidence du rayonnement solaire, variant selon la latitude, sur la quantité de chaleur reçue. Source : [PMFIAS](#), 2015.

Cycles de Milankovitch

Sur le long terme, à l'échelle de dizaines et de centaines de milliers d'années, l'évolution du climat planétaire représente une alternance cyclique d'ères glaciaires et d'ères interglaciaires. Cette alternance est surtout causée par l'existence de trois cycles astronomiques, nommés cycles de Milankovitch², qui influencent directement la quantité d'énergie solaire reçue à la surface terrestre. Pour être plus précis, ces cycles entraînent des variations périodiques de l'excentricité de l'ellipse terrestre, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et de la précession des équinoxes. Chacun des cycles de Milankovitch, résumés dans la figure 2, affecte le climat à sa façon et possède sa propre périodicité. En fonction de la quantité d'énergie solaire reçue à sa surface, la planète se trouve ainsi en période glaciaire ou interglaciaire. L'ère interglaciaire actuelle, nommée l'Holocène, dure depuis près de 12 000 ans.

² En l'honneur des travaux du géophysicien serbe Milutin Milankovitch sur ce sujet.




Cycle	Représentation	Phénomène astronomique	Périodicité
Excentricité de l'ellipse terrestre		Variation de la forme de la trajectoire de la Terre autour du Soleil (d'un cercle à une ellipse)	100 000 ans
Obliquité de l'axe de rotation		Variation de l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre (entre 22,1° et 24,5°)	41 000 ans
Précession des équinoxes		Variation rotationnelle de l'axe de rotation de la Terre (à la manière d'une toupie)	26 000 ans

Figure 2. Les cycles de Milankovitch. Source: [Slideshare](#), 2014.

Cycles solaires

Le Soleil ne brille pas à la même intensité et n'émet pas le même niveau de rayonnement en permanence. Il s'agit du résultat de son champ magnétique complexe qui fait en sorte que l'activité solaire varie selon un cycle de onze ans. Le champ magnétique du Soleil étant à l'origine de taches apparaissant à sa surface, les cycles solaires sont mesurables par le nombre de ces taches visibles. Les variations de l'activité solaire au cours d'un cycle ont ainsi une influence sur le climat de la Terre, mais celle-ci serait plutôt limitée.

Océans et courants océaniques

Les océans constituent une composante majeure du système climatique. Leur participation dans la régulation du climat est plutôt lente et se fait donc à long terme. D'abord, grâce à la capacité thermique élevée de l'eau, les océans exercent un effet tampon puissant sur le climat. Cet effet tampon se traduit par une tendance à atténuer les excès de chaleur dans l'atmosphère, mais il ne s'arrête pas là. En plus d'absorber une grande quantité de chaleur, les océans captent aussi une quantité non négligeable de dioxyde de carbone (CO₂). Les océans Ils exercent donc un contrôle crucial sur l'intensité des changements du climat et sur la vitesse à laquelle ceux-ci se réalisent.

De plus, les courants océaniques, comme les courants atmosphériques, jouent un rôle important dans les échanges de chaleur entre l'ensemble des régions du globe. Les différents types de courants océaniques agissent de façon concomitante, mais à des échelles spatiotemporelles variées. On trouve notamment des courants générés par les marées, par le vent, par une

différence de densité de l'eau de mer entre deux régions ainsi que par la plongée en profondeur de masses d'eau très froide et salée lors de la formation des glaces aux pôles.

L'EFFET DU GULF STREAM ET DE LA DÉRIVE NORD-ATLANTIQUE SUR LE CLIMAT DE L'EUROPE

Un bon exemple de l'effet des courants marins sur le climat est celui du Gulf Stream et de son prolongement aux hautes latitudes nordiques, la dérive nord-atlantique, sur le climat du continent européen. L'apport de masses d'eau chaude par ce courant réchauffe d'abord l'hémisphère nord en général. Plus particulièrement, il permet surtout à l'Europe de profiter d'un climat plus doux et tempéré, avec des écarts de température bien moindres que les régions aux mêmes latitudes en Amérique du Nord. Un ralentissement ou un arrêt complet de ce courant chaud pourrait ainsi causer un refroidissement important, non seulement de l'Europe, mais de l'hémisphère nord en entier.

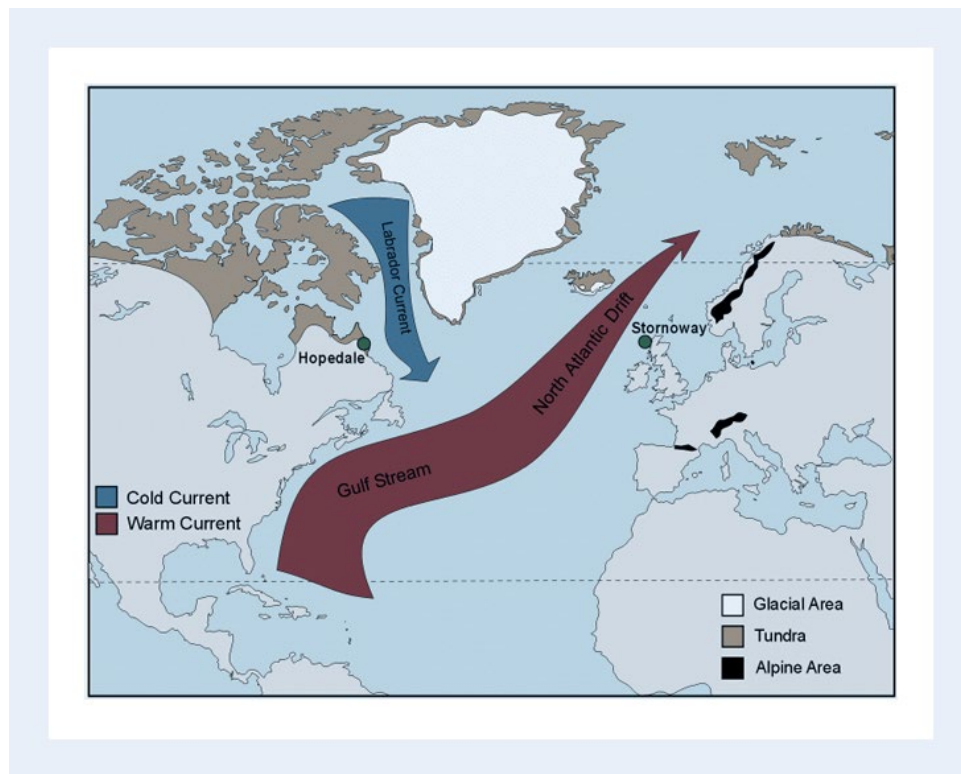


Figure 3. Représentation du Gulf Stream et de la dérive nord-atlantique. Source : [British Society for Geomorphology](#), 2009.

Aérosols, nuages et volcanisme

Les aérosols constituent différents types de particules en suspension dans l'atmosphère. En général, ils ont la propriété de refléter le rayonnement solaire, de sorte que le rayonnement

direct diminue à la surface terrestre. Ils agissent en tant que barrière au rayonnement solaire en quelque sorte. De plus, les aérosols favorisent souvent la création de nuages, qui font aussi obstacle au rayonnement. Ils ont donc globalement un pouvoir refroidissant³ sur l'atmosphère. On trouve différentes sources naturelles d'aérosols, comme l'érosion éolienne du sol, qui contribue à envoyer de petites particules dans l'atmosphère, ainsi que la production de diméthylsulfure (DMS) par certains organismes marins.

Les volcans représentent une autre source naturelle d'aérosols, dont les effets sur le climat sont détectables, mais de courte durée. Lors d'une éruption volcanique, de grandes quantités de dioxyde de soufre (SO₂) et de cendres sont émises dans l'atmosphère. Lorsque le dioxyde de soufre se mélange à la vapeur d'eau en suspension dans l'air, il forme un aérosol. Après une éruption volcanique majeure, les aérosols et les poussières volcaniques s'étendent autour du globe en quelques jours. La grande quantité d'aérosols diminue ainsi momentanément le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre. L'effet refroidissant pour l'atmosphère qui en découle ne dure cependant que de quelques mois à quelques années tout au plus.

On trouve aussi certaines sources anthropiques d'aérosols, bien qu'elles soient faibles par rapport aux sources naturelles, comme la combustion d'énergies fossiles qui produit du dioxyde de soufre ainsi que la déforestation qui exacerbe l'érosion éolienne du sol.

Albédo des surfaces

L'albédo se définit comme la fraction de l'énergie lumineuse que réfléchit ou diffuse un corps non lumineux, comme la surface de la Terre. Selon ce qui la compose, la surface de la Terre a donc un albédo variable. Les surfaces enneigées ou englacées ont un albédo élevé, c'est-à-dire qu'elles réfléchissent une proportion substantielle de l'énergie lumineuse qui les atteint. Ces surfaces agissent en d'autres mots comme des miroirs au rayonnement solaire et contribuent donc au refroidissement de l'atmosphère. À l'inverse, les surfaces foncées, comme celles recouvertes d'asphalte, ont un albédo plus faible, et absorbent ainsi davantage l'énergie lumineuse. Elles contribuent alors au réchauffement de l'air.

L'albédo des surfaces joue un rôle important dans la régulation du climat, surtout par ses rétroactions sur ce dernier. En effet, une surface enneigée ou englacée, comme l'inlandsis⁴ du Groenland, par exemple, qui a initialement un pouvoir refroidissant grâce à son albédo élevé, voit son albédo diminuer avec la fonte de la neige et de la glace en raison de la hausse des températures atmosphériques. La baisse de l'albédo de cette surface contribue ainsi au réchauffement de l'air à son tour. Cela exacerbe la fonte de la neige et de la glace ainsi que la baisse de l'albédo de la surface, et ainsi de suite.

Effet de serre et gaz à effet de serre

L'effet de serre est un des facteurs influençant de façon significative le climat. Il nous intéresse ici particulièrement puisque l'humain y joue un rôle considérable depuis la révolution industrielle au 19^e siècle.

³ Certains aérosols, comme le noir de carbone, à l'inverse, absorbent la chaleur et contribuent ainsi au réchauffement de l'atmosphère.

⁴ Glacier continental de très grande superficie.

L'effet de serre est un phénomène d'origine naturelle qui entraîne la conservation d'une partie de la chaleur émise par le Soleil dans l'atmosphère de la planète. Sans l'effet de serre, le développement de la vie serait plus difficile. La température moyenne à la surface de la Terre serait d'environ -18 °C. Grâce à l'effet de serre, la température moyenne sur Terre est d'environ 15 °C. Plus précisément, l'énergie provenant du Soleil qui traverse l'atmosphère est absorbée en partie par la surface de la planète. L'énergie emmagasinée par le sol et les océans est ensuite réémise, sous forme de rayons infrarouges (chaleur), vers l'atmosphère. Une proportion de ces rayons infrarouges traverse l'atmosphère et se retrouve dans l'espace, alors que le reste est emprisonné dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre, contribuant ainsi à son réchauffement. La plupart des gaz à effet de serre retrouvés dans l'atmosphère sont naturellement émis par différentes sources. Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, certaines activités anthropiques émettent aussi des gaz à effet de serre, ce qui provoque une hausse de leurs concentrations dans l'atmosphère et, en conséquence, un réchauffement non naturel de cette dernière.

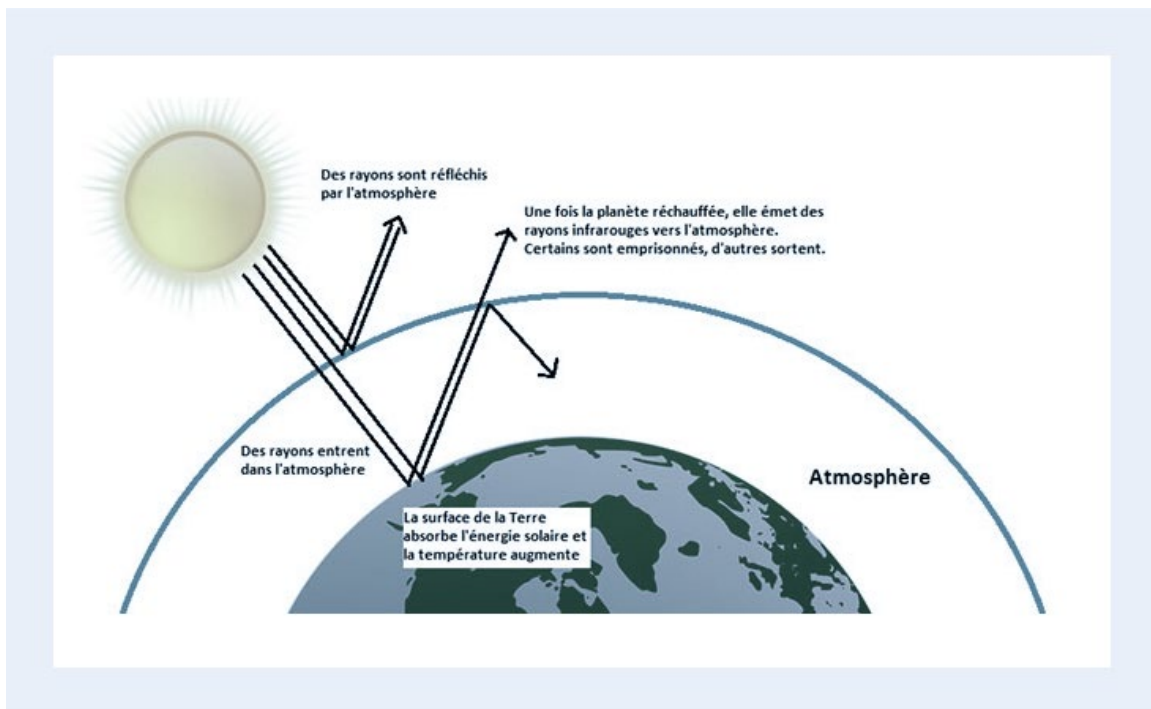


Figure 4. Représentation de l'effet de serre. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec, 2021.

L'étude du climat

L'intérêt et la curiosité de l'humain envers le climat et son fonctionnement ne datent pas d'hier. Déjà, durant l'Égypte antique, il y a plusieurs milliers d'années, les Égyptiens semblaient s'intéresser au climat et être conscients de leur dépendance aux humeurs de la nature. Ce n'est cependant qu'au tournant du 19^e siècle que la possibilité que l'humain puisse influencer le climat semble être apparue dans l'imaginaire collectif. Certains pionniers de la science du climat

y ont consacré leurs travaux, ou du moins une partie. C'est le cas, notamment, du mathématicien et physicien français Joseph Fourier qui, en 1824, a jeté les bases de la théorie de l'effet de serre ainsi que du chimiste suédois Svante Arrhenius qui, à la fin du 19^e siècle, a mis en relation ce phénomène climatique avec le cycle du carbone et la présence de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Durant les années 1950, les travaux d'autres scientifiques, comme l'Autrichien Hans Suess et l'Américain Charles David Keeling, ont confirmé la hausse des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone depuis la révolution industrielle. Les travaux de ces pionniers ont ainsi contribué à façonner le domaine de la science du climat que l'on connaît aujourd'hui. Leur œuvre a aussi mené aux travaux de recherche modernes portant sur les effets des activités anthropiques sur le climat. L'avancement des connaissances réalisé par ces scientifiques est d'autant plus remarquable, compte tenu des moyens technologiques limités de leur époque respective pour étudier, mesurer et valider leurs observations et théories. Bien que certaines techniques de mesure d'antan soient toujours utilisées de nos jours, le progrès technologique a permis le développement d'outils désormais incontournables.

Comment retrouve-t-on les traces du climat passé?

Afin de reconstituer le climat d'époques antérieures aux technologies de mesure en temps réel, les paléoclimatologues⁵ ont recours à différentes méthodes. Parmi les plus connues, on trouve l'extraction d'échantillons de glace et de sédiments marins ou lacustres, communément appelé « carottage », ainsi que la dendrochronologie.

Les glaciers terrestres possèdent une propriété bien spéciale. Ils renferment, entre les cristaux de neige ou de glace qui les composent, des bulles d'air provenant de l'époque à laquelle les couches de ces dernières se sont formées. Les couches de neige et de glace s'accumulent de manière continue dans le temps sur les glaciers. Les plus anciennes étant les plus profondément enfouies, elles permettent aux scientifiques de remonter dans le temps et d'échantillonner l'air d'antan. Les concentrations de gaz à effet de serre du passé peuvent notamment être mesurées et les températures atmosphériques estimées à partir de ces bulles d'air.

Les sédiments, qu'ils soient marins ou lacustres, sont constitués de la matière, provenant d'organismes vivants ou non, qui se dépose au fond des océans et des lacs. Tout comme la neige et la glace des glaciers, les couches de sédiments s'accumulent de manière continue dans le temps. En analysant leur composition, notamment le type de sédiments, le type d'organismes contenus dans les sédiments et l'épaisseur des couches, les chercheurs reconstituent à partir de ces « archives naturelles » certaines conditions environnementales antérieures.

Bien que généralement limitée du point de vue temporel et spatial, l'analyse des cernes de croissance des arbres, appelée la dendrochronologie, peut être également utilisée pour reconstituer les conditions climatiques antérieures. Une séquence de cernes de croissance rapprochés d'un tronc d'arbre signifie que le climat n'était pas propice à la croissance de l'arbre. Le climat devait donc être probablement plus froid et sec. À l'inverse, des cernes plus espacés représentent des années de conditions favorables à la croissance, soit un climat plus chaud et

⁵ Spécialistes étudiant le climat passé.

humide en général. Sans pouvoir déterminer exactement la température et les quantités de précipitations du passé, la dendrochronologie donne tout de même un indice sur la fluctuation des conditions climatiques durant la vie des arbres analysés.



Figure 5. Principes de la dendrochronologie. Source : [Earth Science Australia](#), 2021.

Observation du climat actuel

Les humains disposent depuis peu des technologies propres à la collecte et à un enregistrement en continu de données sur la météo et le climat. La collecte journalière de ces données permet ainsi de mieux comprendre l'évolution récente du climat, notamment dans le contexte des changements climatiques, et contribue dans une large mesure à la prévision du climat futur. Il existe un réseau mondial d'observations météorologiques comprenant une multitude de stations et d'instruments de mesure répartis à travers le globe, autant sur les continents, dans les airs et au milieu des océans. Ce réseau comporte, entre autres, des stations terrestres, des satellites, des bouées, des ballons-sondes, des avions, des bateaux et plus encore. Il permet de mesurer simultanément et continuellement plusieurs éléments comme la température de l'air, la quantité de précipitations, la concentration des différents gaz retrouvés dans l'atmosphère, le taux d'humidité, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent. Les différentes composantes du réseau sont gérées par des services météorologiques dispersés à travers le monde, dont plusieurs sont des services météorologiques nationaux, qui échangent les données amassées en continu. L'observation du climat actuel et les prévisions météorologiques sont donc basées sur un partage de données et une étroite collaboration entre différents acteurs. Le tout est chapeauté par l'Organisation météorologique mondiale.

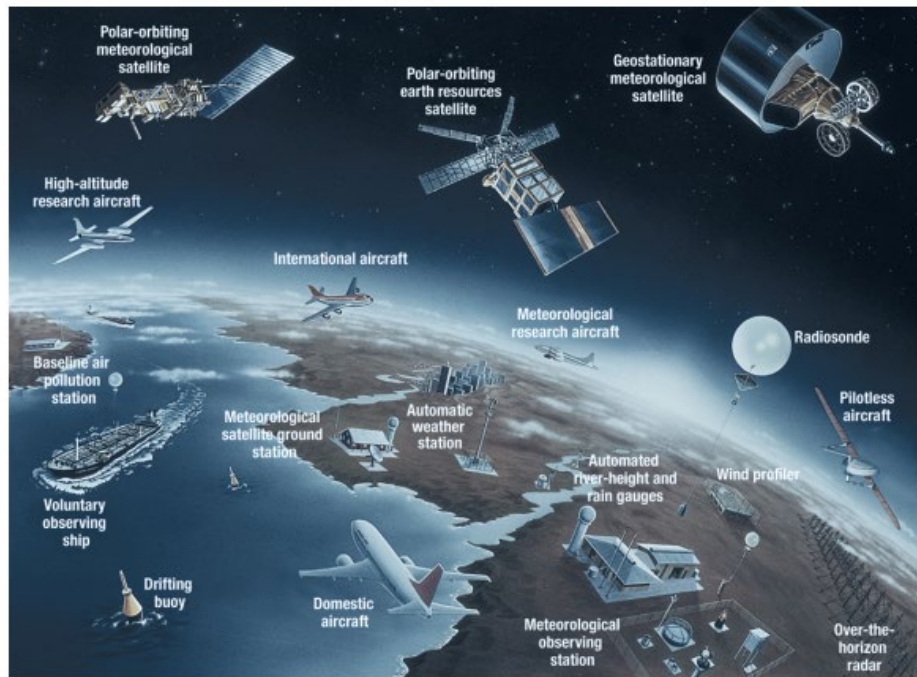


Figure 6. Réseau mondial d'observations météorologiques. Source : [Organisation météorologique mondiale](#), 2021.

Changements, variations ou réchauffement du climat

Avant d'aller plus loin, il importe de différencier certains concepts liés au climat qui sont régulièrement abordés dans la littérature. D'abord, le terme « variations climatiques » fait généralement référence aux variations du climat d'origine naturelle. L'expression « changements climatiques », quant à elle, se définit, selon la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, comme « des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale [émissions de gaz à effet de serre] et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables⁶ ». Le terme « changements climatiques » réfère ainsi intrinsèquement au rôle que joue l'humain dans l'origine de ces derniers.

Les expressions « réchauffement climatique », « réchauffement planétaire » et « réchauffement global » sont aussi fréquemment utilisées dans les ouvrages portant sur le climat. Elles réfèrent à la tendance à la hausse de la température moyenne à la surface la Terre. Ces expressions sont souvent utilisées à tort comme synonymes de « changements climatiques ». Bien qu'il ne soit pas faux qu'une tendance à la hausse de la température moyenne planétaire est observée, les

⁶ [Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques](#), Nations unies, 1992, p. 5.

changements climatiques englobent une multitude d'autres répercussions, comme il sera possible de le constater dans les prochaines sections de cette série.

Le terme « changements climatiques » sera ainsi privilégié. D'emblée, les mécanismes qui régulent naturellement le climat terrestre ne peuvent expliquer les changements rapides observés depuis quelques décennies. La prochaine partie de cette série abordera le rôle des gaz à effet de serre. Naturellement présents dans l'atmosphère, leur concentration augmente rapidement depuis les débuts de l'ère industrielle. Les émissions provenant des activités humaines jouent un rôle déterminant dans les dynamiques observables et les changements climatiques projetés.

1.2 BILAN ET CARACTÉRISTIQUES DES PRINCIPAUX GAZ À EFFET DE SERRE

Les gaz à effet de serre

Comme mentionné précédemment, la majorité des gaz à effet de serre sont d'abord émis de façon naturelle par différentes sources présentes sur la Terre. En contrepartie, des puits d'élimination⁷ naturels retirent ces gaz de l'atmosphère ou neutralisent leur potentiel de réchauffement. Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, au XIX^e siècle, certaines activités humaines émettent aussi des gaz à effet de serre. Une augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère est ainsi observée puisque le taux d'émission par les sources, naturelles et anthropiques réunies, dépasse le taux d'élimination par les puits.

Les principaux gaz à effet de serre retrouvés dans l'atmosphère sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (ou le protoxyde d'azote; N₂O), les gaz fluorés et la vapeur d'eau (H₂O). Chaque GES possède ses propres sources d'émissions et ses propres puits d'élimination. En fonction de ces derniers, les concentrations atmosphériques de chaque GES ont donc varié au cours des derniers siècles. De plus, chaque GES a un potentiel de réchauffement planétaire différent. Celui-ci est fondé à la fois sur la durée de vie du gaz, c'est-à-dire sur le temps nécessaire pour que le gaz soit éliminé de l'atmosphère, ainsi que sur son efficacité relative à absorber le rayonnement infrarouge (la chaleur), qui dépend des propriétés moléculaires du gaz. En d'autres termes, plus un GES a une longue durée de vie dans l'atmosphère et plus son efficacité à absorber le rayonnement infrarouge est grande, plus son potentiel de réchauffement planétaire est élevé. Le potentiel de réchauffement planétaire se mesure généralement en valeur relative à celui du CO₂. Il équivaut donc à 1 pour le CO₂, gaz de référence. En fonction de ses concentrations et de son potentiel de réchauffement planétaire, chaque GES a ainsi son propre effet sur le climat.

⁷ On fait référence à un puits d'élimination lorsqu'un GES contenu dans l'atmosphère est retiré puis stocké dans une autre composante de l'écosystème (souvent sous une autre forme moléculaire). Un GES peut aussi demeurer dans l'atmosphère, mais réagir chimiquement et changer de forme moléculaire, perdant essentiellement son pouvoir de réchauffement.

Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre le plus connu. Sa concentration dans l'atmosphère connaît une forte augmentation depuis le XIX^e siècle. En effet, alors qu'elle représentait environ 280 ppm⁸ à l'époque préindustrielle, la concentration atmosphérique de CO₂ s'élève à plus de 413 ppm en juillet 2021⁹ (hausse d'un facteur 1,5). Il s'agit d'une valeur qui n'a jamais été atteinte durant les 800 000 dernières années¹⁰. Cette hausse est aussi très rapide. Seulement depuis 1960, la concentration de CO₂ a augmenté de près de 100 ppm. À titre comparatif, au cours des 8 000 ans précédant l'industrialisation au 19^e siècle, une variation d'environ seulement 20 ppm a été enregistrée.

Tableau 1. Sources d'émissions naturelles et anthropiques et puits d'élimination du CO₂.

Sources d'émissions naturelles	<ul style="list-style-type: none">• Échanges gazeux océans-atmosphère• Respiration des êtres vivants• Décomposition de la matière organique• Feux de forêt• Éruptions volcaniques
Sources d'émissions anthropiques	<ul style="list-style-type: none">• Combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) pour produire de l'énergie• Combustion de biomasse (animale ou végétale) pour produire de l'énergie• Changements d'affectation des terres (surtout la transformation des étendues forestières en zones agricoles)
Puits d'élimination	<ul style="list-style-type: none">• Séquestration par les océans (sous forme physique, chimique et biologique)• Séquestration par les êtres vivants (principalement par les végétaux grâce à la photosynthèse)

⁸ Parties par million.

⁹ National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, [Trends in Atmospheric Carbon Dioxide: Global Monthly Mean CO₂](#).

¹⁰ National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers for Environmental Information, [Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide](#).

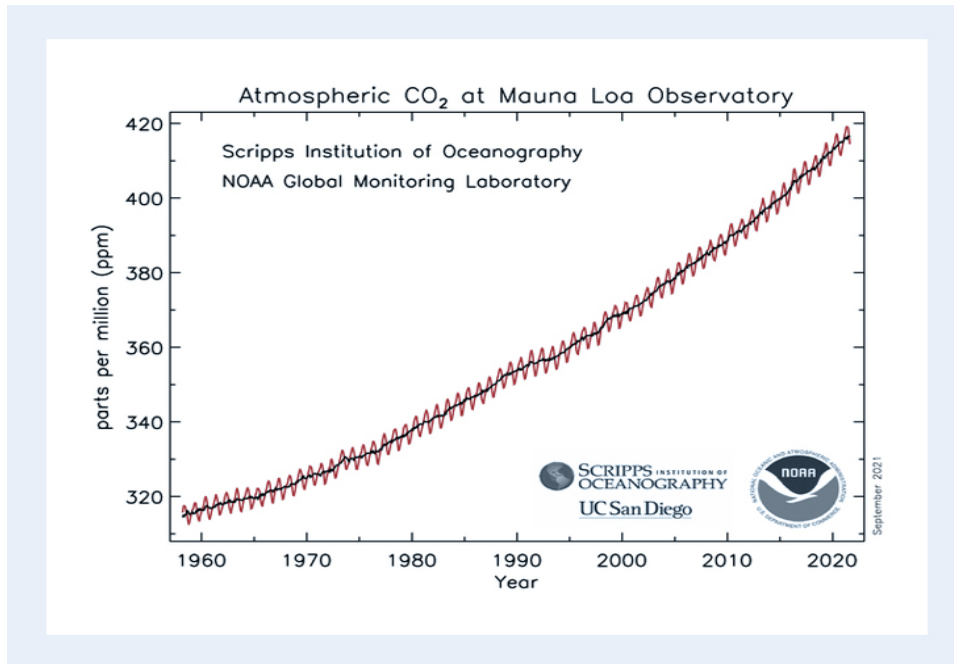


Figure 7. Hausse des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone depuis 1958.

Source : [National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, 2021.](#)

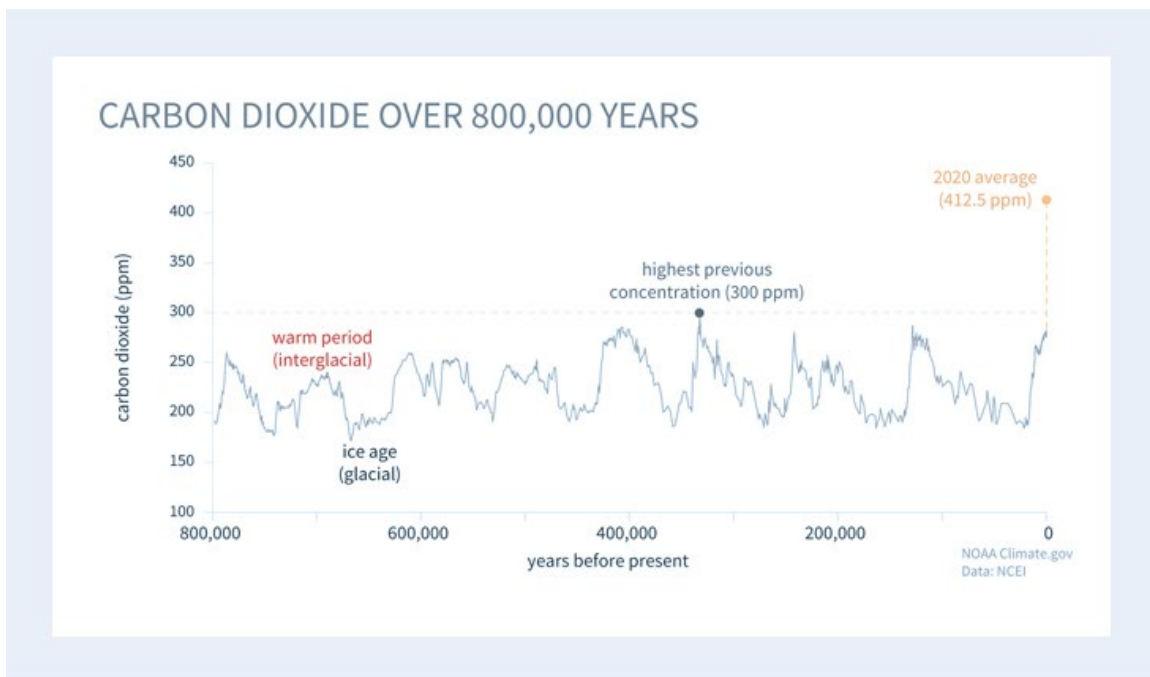


Figure 8. Variation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone au cours des 800 000 dernières années. Source : [National Oceanic and Atmospheric Administration – National Centers for Environmental Information, 2020.](#)

Le méthane (CH₄)

En date de juin 2021, la concentration atmosphérique de méthane est de plus de 1 888,8 ppb¹¹ ou de 1,89 ppm¹². Cette valeur est plus de 2,5 fois plus élevée que la concentration atmosphérique de méthane de l'époque préindustrielle¹³, qui était autour de 700 ppb. En proportion relative, les concentrations de méthane augmentent donc encore plus rapidement que celles du dioxyde de carbone. Bien qu'il demeure néanmoins beaucoup moins abondant dans l'atmosphère que le dioxyde de carbone, le méthane a un potentiel de réchauffement planétaire 20 à 25 fois plus élevé que ce dernier. Il a donc une influence non négligeable sur l'effet de serre et sur le réchauffement du climat.

Tableau 2. Sources d'émissions naturelles et anthropiques et puits d'élimination du CH₄.

Sources d'émissions naturelles	<ul style="list-style-type: none">• Décomposition anaérobique¹ de la matière organique (principalement dans les milieux humides)• Digestion des ruminants• Feux de forêt• Éruptions volcaniques
Sources d'émissions anthropiques	<ul style="list-style-type: none">• Combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) pour produire de l'énergie• Combustion de biomasse (animale ou végétale) pour produire de l'énergie• Décomposition anaérobique des déchets organiques dans les sites d'enfouissement• Culture intensive du riz²• Élevage intensif de bétail
Puits d'élimination	<ul style="list-style-type: none">• Réaction chimique avec les radicaux d'hydroxyle³ (OH) dans l'atmosphère• Séquestration par certains micro-organismes contenus dans le sol

¹ Sans oxygène.

² Les rizières, avec leurs grandes surfaces d'eau stagnante, sont des milieux propices à la production de méthane.

³ Molécule hautement réactive et, par conséquent, de courte durée de vie qui est créée par une réaction chimique entre la vapeur d'eau et l'oxygène sous l'effet du rayonnement solaire.

¹¹ Parties par milliard.

¹² National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, [Trends in Atmospheric Methane: Global CH₄ Monthly Means](#).

¹³ Quirin Schiermeier, "[Global methane levels soar to record high](#)", Nature news, 14 juillet 2020.

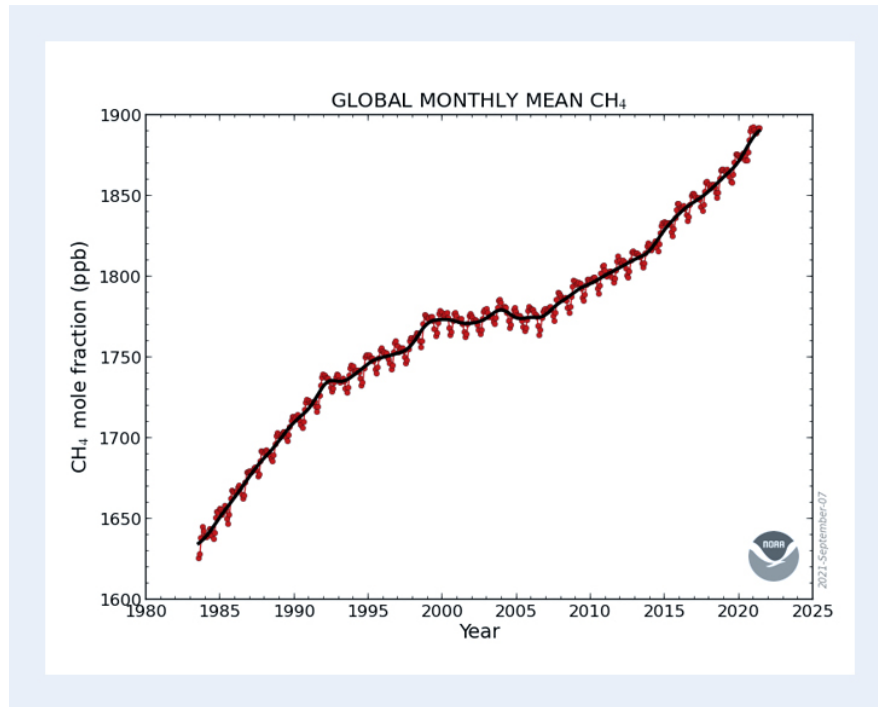


Figure 9. Hausse des concentrations atmosphériques de méthane depuis les années 1980.

Source : National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, 2021.

L'oxyde nitreux (N₂O)

Tout comme le dioxyde de carbone et le méthane, les concentrations atmosphériques d'oxyde nitreux ont connu une forte hausse depuis la révolution industrielle. En effet, ces dernières ont augmenté d'environ 275 ppb au XIX^e siècle à plus de 334 ppb en juin 2021¹⁴ (hausse de plus de 20 %). Bien qu'il demeure lui aussi bien moins abondant dans l'atmosphère que le dioxyde de carbone, l'oxyde nitreux a un potentiel de réchauffement planétaire près de 300 fois plus élevé. Son influence sur l'effet de serre et sur le réchauffement du climat est donc considérable.

Tableau 3. Sources d'émissions naturelles et anthropiques et puits d'élimination du N₂O.

Sources d'émissions naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Processus chimiques de nitrification et de dénitrification de l'azote par les bactéries dans les sols et dans les océans
Sources d'émissions anthropiques	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation intensive des engrais enrichis d'azote¹ • Combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) pour produire de l'énergie

¹⁴ National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, Trends in Atmospheric Nitrous Oxide: Global NO₂ Monthly Means.

	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion de biomasse (animale ou végétale) pour produire de l'énergie • Sous-produits dans certaines industries (notamment celles du nylon et de l'acide nitrique)
Puits d'élimination	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction dans la stratosphère (haute atmosphère) en raison du fort rayonnement solaire

¹ Stimule les processus chimiques de nitrification et de dénitrification par les bactéries.

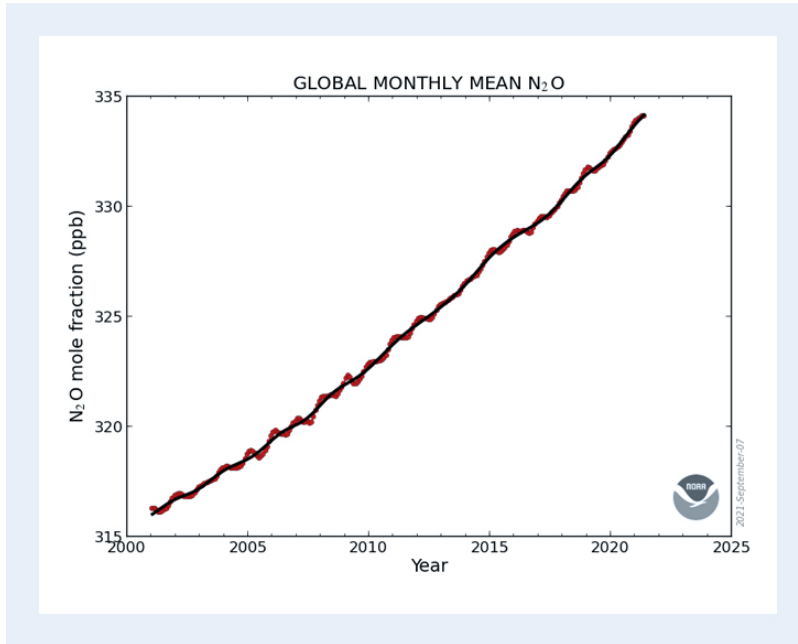


Figure 10. Hausse des concentrations atmosphériques d'oxyde nitreux au 21^e siècle. Source : [National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, 2021](#).

Les gaz fluorés

Les gaz fluorés comportent les hydrofluorocarbures (HFCs), les perfluorocarbures (PFCs), l'hexafluorure de soufre (SF₆) et le trifluorure d'azote (NF₃). Contrairement à la plupart des autres gaz à effet de serre, les gaz fluorés n'ont aucune source naturelle et ne sont produits que par l'humain. Ils ne s'accumulent donc dans l'atmosphère que depuis tout récemment sur l'échelle des temps géologiques. Bien que leurs concentrations soient minimales comparativement aux autres GES (par exemple, la concentration de SF₆ en 2021 est d'environ 10,6 ppt¹⁵), leur potentiel de réchauffement planétaire est pour la plupart extrêmement élevé,

¹⁵ Parties par trillion. National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory, [Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride: Global SF₆ Monthly Means](#).

jusqu'à plusieurs milliers de fois celui du dioxyde de carbone. Qui plus est, plusieurs de ces gaz persistent très longtemps dans l'atmosphère.

Tableau 4. Sources d'émissions naturelles et anthropiques et puits d'élimination des gaz fluorés.

Sources d'émissions naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune
Sources d'émissions anthropiques	<ul style="list-style-type: none"> • Production industrielle de ces gaz pour une utilisation dans les bombes aérosol, la réfrigération et la climatisation • Sous-produits dans certaines industries (notamment la production d'aluminium)
Puits d'élimination	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction dans la stratosphère (haute atmosphère) en raison du fort rayonnement solaire

La vapeur d'eau (H₂O)

La vapeur d'eau est un GES différent des autres, car elle ne s'accumule pratiquement pas dans l'atmosphère. Son cycle de vie est très dynamique. En effet, via le cycle de l'eau, la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère se renouvelle environ aux dix jours. La vapeur d'eau est naturellement le GES le plus abondant dans l'atmosphère et contribue *grosso modo* aux 2/3 de l'effet de serre naturel. Sa contribution à l'effet de serre est importante, mais non altérée de manière significative par les activités humaines. Les émissions anthropiques directes de vapeur d'eau dans l'atmosphère sont peu élevées. Cependant, une hausse des températures causée par les changements climatiques, ceux-ci découlant des actions de l'humain, pourrait entraîner une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère en raison d'une évaporation accrue. Une telle hausse pourrait provoquer des réactions-clés sur le climat, notamment intensifier le cycle de l'eau et modifier la quantité comme la répartition des précipitations.

Répartition des émissions anthropiques de gaz à effet de serre

Tout comme leurs concentrations atmosphériques diffèrent, les proportions des différents gaz à effet de serre émis par les activités humaines varient. En effet, selon le rapport d'évaluation¹⁶ du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2014, la grande majorité des émissions anthropiques de GES sont composées de dioxyde de carbone (76 % des émissions totales). Suivent celles de méthane (16 % des émissions totales), d'oxyde nitreux (6 %) et de gaz fluorés (2 %).

¹⁶ IPCC (GIEC), 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

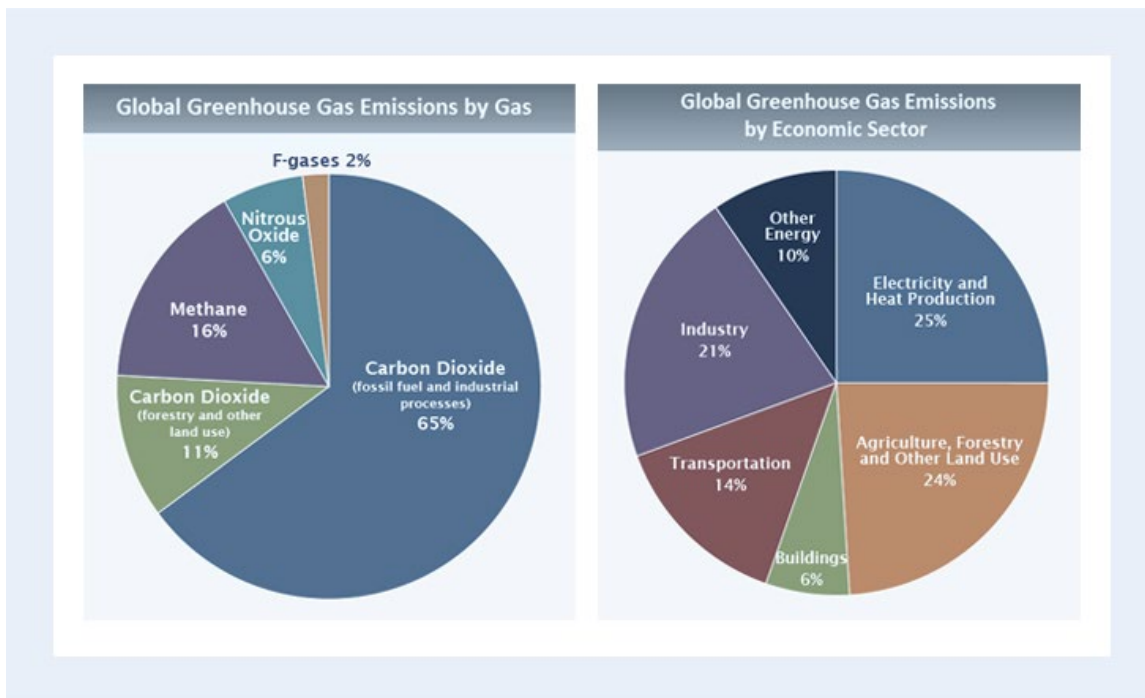


Figure 11. Répartition des émissions de gaz à effet de serre par gaz et par secteur économique.

Source : United States Environmental Protection Agency, 2021.

Qui plus est, les différents secteurs économiques ne sont pas responsables des émissions anthropiques de GES dans les mêmes proportions. Le secteur de la production d'électricité et de chaleur ainsi que celui de l'agriculture, de la foresterie et des autres formes d'utilisation des terres sont responsables chacun du quart des émissions planétaires de GES. On trouve ensuite les secteurs de la production industrielle (21 % des émissions totales) et du transport (14 %). Enfin, le secteur des bâtiments et la catégorie « énergie (autre) »¹⁷ représentent 6 % et 10 % respectivement des émissions totales.

1.3 ÉTUDE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : OBSERVATIONS DES PERTURBATIONS ACTUELLES DU SYSTÈME CLIMATIQUE

Des acteurs-clés

L'étude des changements climatiques nécessite bien sûr l'observation en continu du climat afin d'en mesurer les perturbations, autant à l'échelle locale que planétaire. Pour ce faire, le réseau mondial d'observations météorologiques, qui comprend de multiples stations et instruments de mesure répartis à travers le globe, ainsi que l'expertise des scientifiques du climat sont mis à contribution. Tout comme l'étude des conditions météorologiques et climatiques en général, l'étude des changements climatiques se fonde sur un partage d'information et sur une étroite collaboration d'une panoplie d'acteurs à l'échelle planétaire.

¹⁷ Contient les émissions du secteur énergétique qui ne sont pas directement associées à la production d'électricité ou de chauffage, comme l'extraction, le raffinage et le transport de combustibles.

À l'international, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est l'organe des Nations unies chargé d'évaluer la science liée aux changements climatiques. Il compte 195 États membres. Créé en 1988, l'objectif du GIEC est de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socioéconomiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de lutte et d'adaptation. Le GIEC n'est ainsi pas un organisme de recherche à proprement parler. Ce panel d'experts internationaux est plutôt responsable d'évaluer et de faire la synthèse, de façon objective, de l'état des connaissances relatives aux changements climatiques produites par la communauté scientifique mondiale. L'exercice comprend notamment l'évaluation des conditions climatiques observées actuellement et les projections simulées à partir de modèles climatiques. D'ailleurs, les modèles du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique sont parmi ceux qu'utilise le GIEC¹⁸. Depuis sa création, le GIEC a produit cinq rapports d'évaluation multivolumes, accessibles à tous sur son [site Web](#). Le GIEC a publié tout récemment, en août 2021, [le premier volume de son sixième rapport](#). Les volumes suivants sont attendus en 2022. Les rapports produits par le GIEC reposent sur l'analyse de milliers de publications scientifiques. Ils constituent une référence pour les 195 pays membres sur l'état actuel des connaissances relatives aux changements climatiques.

En sol québécois, le consortium Ouranos est aussi un acteur-clé dans l'étude des changements climatiques. Il regroupe des experts de ministères, d'universités et d'autres institutions publiques et privées. Le consortium a été créé en 2001 par le gouvernement du Québec, Hydro-Québec et Environnement Canada « dans une volonté de rassembler les intervenants concernés et préoccupés par les impacts des changements climatiques qui affectaient déjà la société québécoise¹⁹ ». En tant que pôle de recherche sur les changements climatiques au Québec, Ouranos a pour mission d'aider la société québécoise à mieux s'y adapter en se basant sur des connaissances scientifiques. La programmation scientifique d'Ouranos est chapeautée par quatre groupes de travail, portant respectivement sur la science du climat, la coordination de la science de l'adaptation, les analyses socioéconomiques et la mobilisation des connaissances. Ces groupes de travail dirigent un total de dix programmes scientifiques spécifiques. Par ailleurs, certains scientifiques prenant part aux travaux d'Ouranos contribuent également à ceux du GIEC. En 2015, le consortium a publié sa plus récente [synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec](#). Cette synthèse fournit un état des connaissances sur l'évolution du climat, sur les effets des changements climatiques, sur les vulnérabilités ainsi que sur les progrès en adaptation dans différents secteurs d'intérêt pour le Québec.

Quelques changements climatiques observés

Comme nous le verrons dans un prochain volet sur les *Projections climatiques en bref*, des changements majeurs du climat sont attendus au cours du XXI^e siècle. Cependant, plusieurs d'entre eux se manifestent déjà et sont répertoriés dans les études climatiques. Nous nous

¹⁸ Rattaché à la Division de la recherche climatique d'Environnement et Changement climatique Canada, le Centre élabore et opère des modèles informatiques du système climatique pour simuler le climat mondial et canadien et pour prédire les changements sur les échelles saisonnières et centennales.

¹⁹ Ouranos, [Plan stratégique. 2020-2025](#).

concentrerons ici sur les changements observés jusqu'à maintenant concernant la température et les précipitations.

D'abord, on note une hausse de la température à la surface de la Terre. Il s'agit certainement de la manifestation des changements climatiques la plus connue du grand public. D'après le plus récent rapport d'évaluation du GIEC²⁰ paru en 2021, chacune des quatre dernières décennies, 1981, 1991, 2001 et 2011, a été successivement la plus chaude depuis 1850. En 2020, la température moyenne planétaire a été plus élevée d'environ 1,02 °C²¹ que celle de la période 1951-1980. L'année 2020 se trouve ainsi à égalité avec l'année 2016 pour l'année la plus chaude enregistrée depuis 1880, date à laquelle la mesure et l'enregistrement de données météorologiques ont débuté. La hausse de la température des dernières décennies s'est accompagnée d'une augmentation du nombre de journées chaudes et d'une diminution du nombre de journées froides à l'échelle planétaire²². Le réchauffement du dernier siècle et demi n'a cependant pas été linéaire et constant, certaines périodes connaissant une hausse des températures plus intense que d'autres (figure 12). Un aspect qui s'explique principalement par la variabilité naturelle du climat et par des événements ponctuels qui se superposent aux changements causés par les activités humaines²³, comme un fort El Niño²⁴ par exemple. Bien qu'à peu près toute la surface du globe ait vu sa température croître, certaines régions ont connu un réchauffement plus intense que d'autres. C'est le cas notamment de l'Arctique et des régions terrestres de l'hémisphère nord en général (figure 13). Le Québec a d'ailleurs connu une hausse considérable de ses températures. Selon la plus récente synthèse²⁵ du consortium Ouranos publiée en 2015, on y observe des tendances à la hausse des températures moyennes annuelles d'environ 1 à 3 °C selon les régions depuis 1950. À l'opposé, le réchauffement est plutôt limité dans certaines régions du sud de la planète, particulièrement à certains endroits de l'océan Austral et sur le continent antarctique, où une tendance au refroidissement est même observée (figure 13). Ces variantes temporelles et régionales illustrent bien la complexité des changements climatiques. L'observation locale ou de courte durée des conditions climatiques ne permet pas de définir les tendances à grande échelle, d'où l'importance d'étudier le phénomène des changements climatiques dans sa globalité.

²⁰ IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

²¹ National Aeronautics and Space Administration, *Facts - Global temperature*, 2021.

²² Les journées chaudes sont celles au cours desquelles la température est supérieure au 90^e centile de la distribution des températures mesurées durant la période de référence de 1961 à 1990. Les journées froides sont celles au cours desquelles la température est inférieure au 10^e centile de la distribution des températures mesurées durant la période de référence de 1961 à 1990. IPCC, 2021, *op. cit.*

²³ IPCC, 2021, *op. cit.*

²⁴ Le phénomène El Niño se manifeste par une hausse de la température des eaux de surface de l'est de l'océan Pacifique près de l'équateur en raison de l'atténuation ou du renversement des vents alizés dans la région. Les eaux plus chaudes dégagent de la chaleur et de l'humidité au large des côtes de l'Équateur et du Pérou, ce qui entraîne des tempêtes plus fréquentes et des chutes de pluie torrentielles sur ces régions normalement arides. Cela engendre une modification de la circulation atmosphérique et influence ensuite les conditions météorologiques à l'échelle de la Terre. Ce phénomène a lieu tous les deux à sept ans.

²⁵ Ouranos. *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Édition 2015*, Montréal, Québec : Ouranos. 415 p.

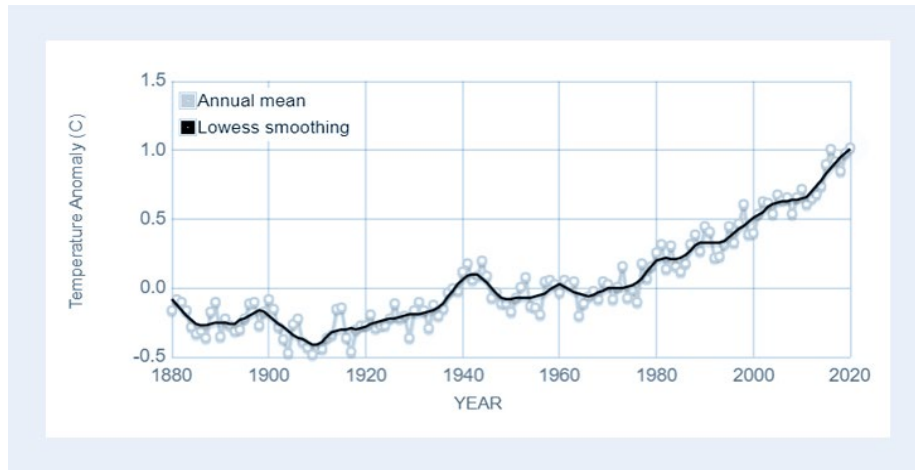


Figure 12. Évolution de l'anomalie de la température planétaire moyenne annuelle par rapport à la valeur moyenne de 1951-1980 durant la période de 1880 à 2020. Source : [NASA's Goddard Institute for Space Studies \(GISS\)](#), 2021.

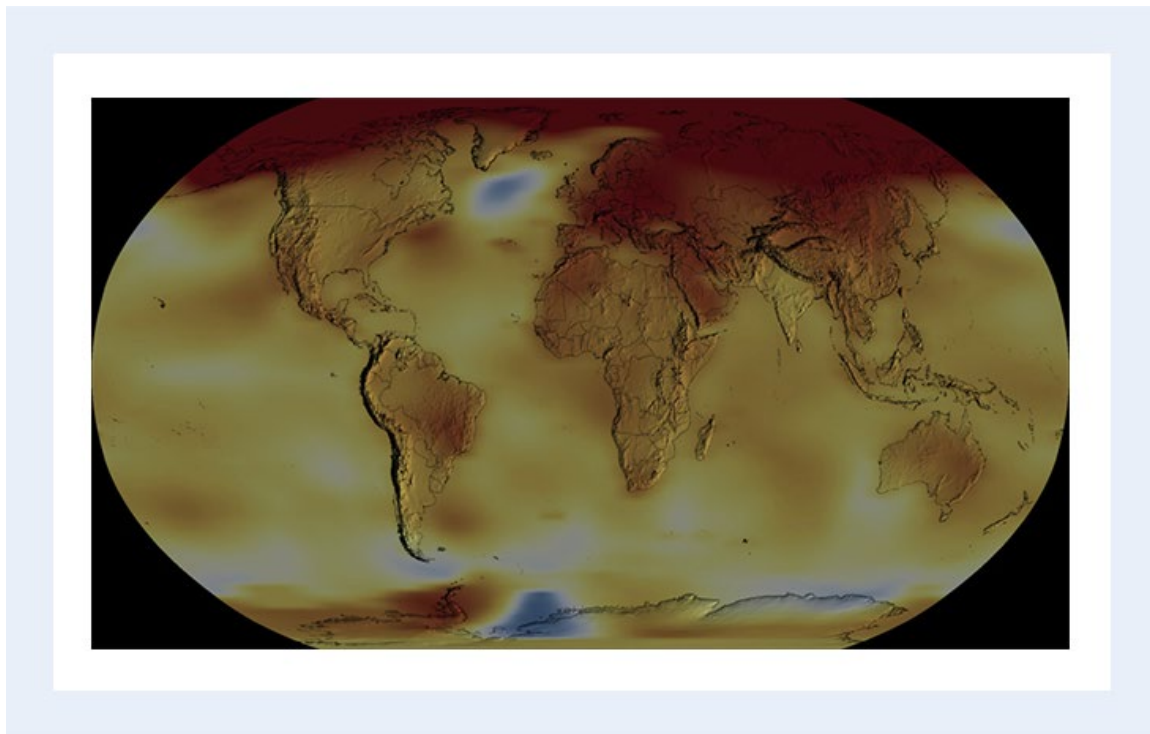


Figure 13. Cartographie de la différence entre la température moyenne de 2016-2020 et la valeur moyenne de 1951-1980. Les températures supérieures à la moyenne sont indiquées par une gradation du jaune au rouge alors que celles inférieures à la moyenne sont signalées en bleu. Source : [NASA](#), 2021.

LE RÉCHAUFFEMENT PARTICULIÈREMENT INTENSE DE L'ARCTIQUE

Comme il est possible de le constater, l'Arctique, comprenant ses régions terrestres et océaniques, est le lieu sur la planète qui se réchauffe le plus intensément. Selon un rapport spécial du GIEC²⁶ paru en 2018, l'Arctique se réchauffe de deux à trois fois plus rapidement que n'importe où ailleurs dans le monde. Cela n'est bien sûr pas sans conséquence sur les écosystèmes qui dépendent de cet environnement glacial. Mais pourquoi l'Arctique se réchauffe-t-il plus rapidement?

La cause principale de ce phénomène est l'importante fonte de la banquise couvrant l'océan Arctique et l'albédo²⁷ de la région qui, par conséquent, s'en trouve diminué. Une surface couverte de neige et de glace, comme la banquise arctique, réfléchit efficacement les rayons solaires. Elle a donc initialement un pouvoir refroidissant grâce à son albédo élevé. En raison de la hausse des températures atmosphériques dans la région, elle voit cependant son albédo diminuer avec la fonte de la neige et de la glace et avec la hausse de l'exposition d'eau libre de glace, qui réfléchit moins les rayons solaires et qui absorbe davantage de chaleur. La baisse de l'albédo de cette surface contribue ainsi au réchauffement de l'air à son tour. L'absorption de chaleur par les surfaces d'eaux libres de glace contribue à leur propre réchauffement. Cela exacerbe donc la fonte de la neige et de la glace aux alentours ainsi que la baisse de l'albédo de la surface de la région, et ainsi de suite. Cette boucle de rétroaction contribue à réchauffer fortement l'Arctique et à réduire, non pas seulement la superficie de la banquise, mais également son épaisseur. Cela fragilise la banquise arctique et accélère sa fonte.

La circulation atmosphérique globale, qui transporte l'excédent de chaleur emmagasinée par la Terre vers les pôles, contribue aussi au réchauffement intense de l'Arctique.

Les effets du réchauffement intense de cette région polaire ne sont toutefois pas contenus à ses limites géographiques. Ils affectent le climat dans le monde entier, surtout dans l'hémisphère nord, comme l'explique l'encadré ci-dessous.

²⁶ IPCC (GIEC), 2018: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

²⁷ L'albédo se définit comme la fraction de l'énergie du soleil qui est réfléchi vers l'espace.

VORTEX POLAIRE DANS L'HÉMISPHERE NORD : UN EXEMPLE CONCRET DE LA COMPLEXITÉ DU CLIMAT ET DE SES PERTURBATIONS

Le vortex polaire consiste en une large région de basse pression atmosphérique composée de masses d'air froid couvrant le pôle Nord²⁸. Il est entouré d'un courant-jet²⁹ qui circule vers l'est. Le courant-jet délimite les masses d'air froid du pôle Nord et les masses d'air chaud des latitudes plus basses. Une différence de pression atmosphérique importante entre le pôle Nord et les régions au sud rend le courant-jet fort et maintient les masses d'air froid au nord et les masses d'air chaud au sud. Il s'agit de la situation dite « normale ». Cependant, il arrive fréquemment, souvent durant l'hiver, que la différence de pression atmosphérique entre le pôle Nord et les régions plus au sud diminue, ce qui affaiblit le courant-jet. Cela rend ainsi le courant-jet sinueux et entraîne, par le fait même, des masses d'air froid dans certaines régions au sud et des masses d'air chaud vers le nord. Les régions des moyennes latitudes, comme le Québec, sont généralement les plus affectées par ce phénomène. On peut penser, par exemple, à la vague de froid extrême qui est survenue en janvier-février 2019 dans le centre des États-Unis et dans le centre et l'est du Canada³⁰. Comme le phénomène est dynamique, ces vagues de froid ou de chaleur que cela cause dans certaines régions ne sont que temporaires.

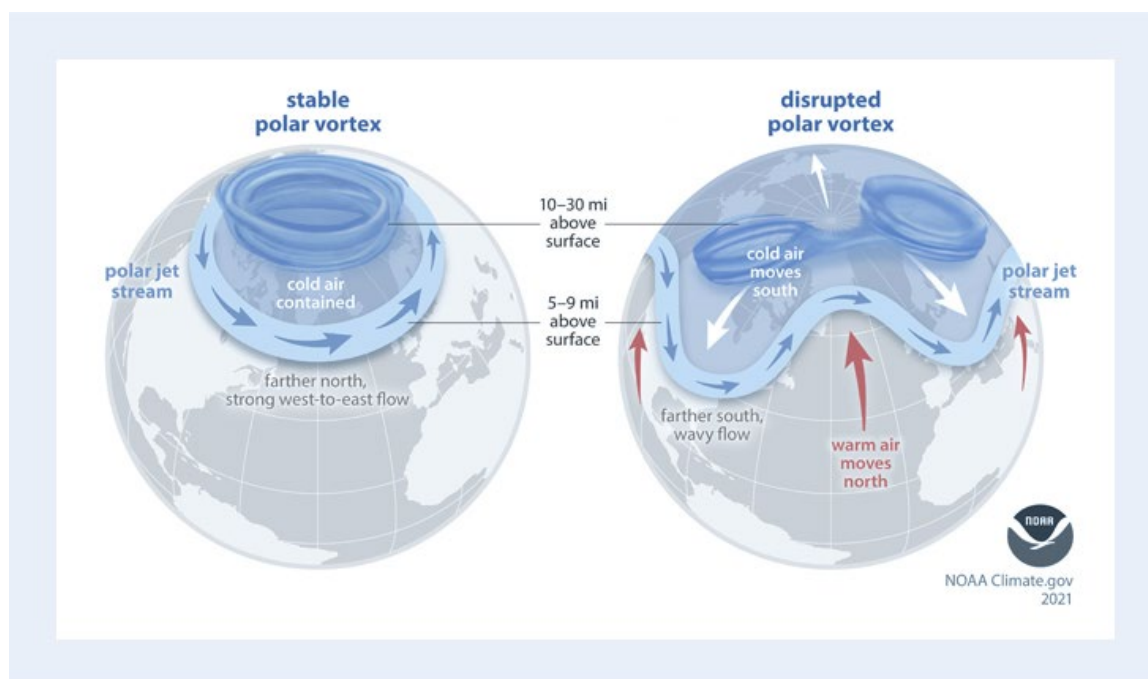


Figure 14. Représentation du vortex polaire et du courant-jet. Source : [National Oceanic and Atmospheric Administration](#), 2019.

²⁸ Le même phénomène est aussi présent au pôle Sud.

²⁹ Un courant-jet est un courant d'air fort et permanent qui souffle d'ouest en est en haute troposphère.

³⁰ Cette vague de froid particulière avait fait l'objet de plusieurs articles dans les médias, dont [celui-ci](#) d'ICI Radio-Canada.

Malgré qu'une tendance au réchauffement de la température soit observée dans l'ensemble, autant à l'échelle planétaire qu'à l'échelle de l'Amérique du Nord, les climatosceptiques profitent souvent, à tort, de ces périodes de températures plus arides dans certaines régions nord-américaines pour alimenter leur discours et défendre leur théorie sur l'inexistence des changements climatiques. Cependant, bien que l'affaiblissement périodique du vortex polaire et du courant-jet ne soit pas un phénomène nouveau, plusieurs études ont démontré un lien entre ce dernier et le réchauffement intense de l'Arctique³¹. En effet, la hausse des températures dans l'Arctique et la fonte de la banquise affecterait la différence de pression atmosphérique qui règne en situation normale entre le pôle Nord et les régions plus au sud. Cela influencerait donc la fréquence et la durée des vagues de froid ou de chaleur provoquées par l'affaiblissement du vortex polaire et du courant-jet.

Ainsi, le réchauffement important de certaines régions (l'Arctique dans ce cas-ci) contribue à créer des vagues de chaleur ou, même si cela peut sembler contre-intuitif, de froid intense dans d'autres régions (comme le Québec). Cet exemple illustre de façon claire toute la complexité du climat, de ses perturbations et de leurs répercussions directes et indirectes.

Concernant les précipitations, le dernier rapport d'évaluation du GIEC³² montre qu'une tendance à la hausse de la quantité moyenne reçue est globalement observée sur l'ensemble des continents depuis 1950. Cela inclut le Québec. Il demeure toutefois que des différences régionales à travers le globe sont observées et que les précipitations ont diminué dans certaines régions³³. Lorsqu'on évalue les tendances régionales au Québec, plusieurs tendances observées concernant les précipitations ne sont pas statistiquement significatives et sont donc incertaines selon la dernière synthèse du consortium Ouranos³⁴. Des tendances significatives sont cependant observées depuis 1950 dans le sud du Québec³⁵, où se situe la majorité de la population québécoise. On y observe notamment une hausse des précipitations durant le printemps, l'été et l'automne. À l'échelle du globe, depuis le milieu du XX^e siècle, le nombre d'épisodes de précipitations extrêmes a augmenté³⁶. La fréquence et l'intensité de ces épisodes ont augmenté notamment pour certaines régions en Amérique du Nord, en Europe et en Asie. C'est aussi le cas dans le sud du Québec, où la quantité de précipitations des jours les plus pluvieux présente une tendance à la hausse³⁷.

³¹ Voir notamment l'étude de Kim *et al.*, 2014 publiée dans la revue scientifique *Nature Communications*.

³² IPCC, 2021, *op. cit.*

³³ IPCC, 2021, *op. cit.*

³⁴ Ouranos, 2015, *op. cit.*

³⁵ Voir les délimitations des zones de référence utilisées par le consortium Ouranos dans : Ouranos, 2015, *op. cit.*, p. 2.

³⁶ IPCC, 2021, *op. cit.*

³⁷ La quantité de précipitations provenant des jours dont les accumulations quotidiennes dépassent le 95^e centile de la distribution locale des précipitations. Ouranos, 2015, *op. cit.*

1.4 ÉTUDE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : INTRODUCTION À LA MODÉLISATION CLIMATIQUE, AUX SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DE GES ET AUX PROJECTIONS CLIMATIQUES

L'étude des changements climatiques consiste également à prévoir ce que sera le climat futur. Cette approche est nécessaire afin de comprendre quelles seront les modifications possibles des conditions climatiques tout autour du globe, les répercussions pour les générations futures et comment s'y adapter. Pour y arriver, la communauté scientifique fait appel à un outil, certes complexe, mais indispensable : la modélisation climatique.

Qu'est-ce qu'un modèle?

Les modèles climatiques sont, dans leur plus simple forme, des équations mathématiques de physique et de chimie qui reproduisent les principaux phénomènes météorologiques. Il existe deux principales catégories de modèles, soit les modèles globaux du climat dont l'étendue couvre l'ensemble de la planète ainsi que les modèles régionaux du climat qui en couvrent seulement une partie.

La modélisation de la météo et du climat à l'aide de méthodes mathématiques a été développée il y a presque exactement un siècle. En 1922, le mathématicien et météorologue anglais Lewis Fry Richardson a publié le premier ouvrage à ce sujet intitulé *Weather Prediction by Numerical Process*³⁸. Dans ce livre, Richardson décrivait comment prévoir la météo à court terme à l'aide d'équations mathématiques. Il a ensuite utilisé lui-même sa méthode pour faire une prévision météorologique sur une période de huit heures. Cependant, l'exercice lui prit six semaines à réaliser et se conclut par un échec. Afin d'accélérer le temps de calcul très long, qui devait se faire sans ordinateur à cette époque, Richardson imagina avoir recours à un stade rempli de 64 000 personnes calculant chacune une partie de l'équation. Cela n'était bien sûr pas très réaliste. Ce ne fut qu'avec l'arrivée des premiers ordinateurs que la faisabilité du modèle de Richardson a été reconnue. En 1950, le groupe de travail, dirigé par le mathématicien hongrois John von Neumann et par le météorologue américain Jule Gregory Charney, a réussi la première prévision météorologique à partir de méthodes numériques et à l'aide d'un ordinateur. Quelques années plus tard, le concept a été appliqué à la simulation non pas des conditions météorologiques à court terme, mais plutôt de leur moyenne sur un horizon temporel plus long, soit le climat. Depuis, la modélisation de la météo et du climat a continué de se raffiner, demeurant toutefois à la remorque du progrès technologique et informatique. Encore aujourd'hui, la modélisation climatique requiert des équipes de travail relativement nombreuses et surtout, des ordinateurs très puissants.

Comment les modèles fonctionnent-ils?

Comme mentionné précédemment, les modèles climatiques sont fondés sur des équations mathématiques, plus précisément des équations différentielles. Ces équations prennent en compte les quatre principales lois physiques de la conservation selon le principe « rien ne se perd, rien ne se crée » : celles de la conservation de la masse, de l'énergie, de l'eau et de la

³⁸ Richardson, Lewis Fry, *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press, 1922.

quantité de mouvements. Plus particulièrement, les équations composant les modèles décrivent le comportement des différentes composantes du système climatique (l'atmosphère, les océans, le sol, etc.) et les interactions entre elles sous l'effet de différents facteurs externes tels que le rayonnement solaire, les aérosols et les gaz à effet de serre.

Pour les fins de la modélisation, l'atmosphère est divisée en boîtes distinctes. La taille des boîtes détermine la résolution du modèle. Plus les boîtes sont petites, plus la résolution est précise. Toutefois, la quantité de données nécessaires à la simulation, et par conséquent la puissance informatique requise pour les traiter, augmentent au même rythme que la résolution s'affine. Il importe alors aux modélisateurs de trouver un certain équilibre entre le niveau de résolution du modèle et la puissance informatique nécessaire à son opération. Les modèles globaux ont généralement une résolution spatiale plus grossière, environ de 200-300 km par 200-300 km, tandis que les modèles régionaux ont souvent une résolution de 50 km par 50 km ou moins. À partir des équations mathématiques, on simule ainsi dans chaque boîte, sur l'horizon temporel désiré, des variables, comme la température et les précipitations, en fonction de changements apportés à un ou plusieurs facteurs externes (par exemple, hausse des concentrations atmosphériques de GES). C'est surtout cette étape qui nécessite l'utilisation d'ordinateurs performants puisqu'elle consiste à la résolution d'équations mathématiques complexes. Dans le contexte de l'étude des changements climatiques, les conditions climatiques pour l'horizon 2100 sont généralement simulées.

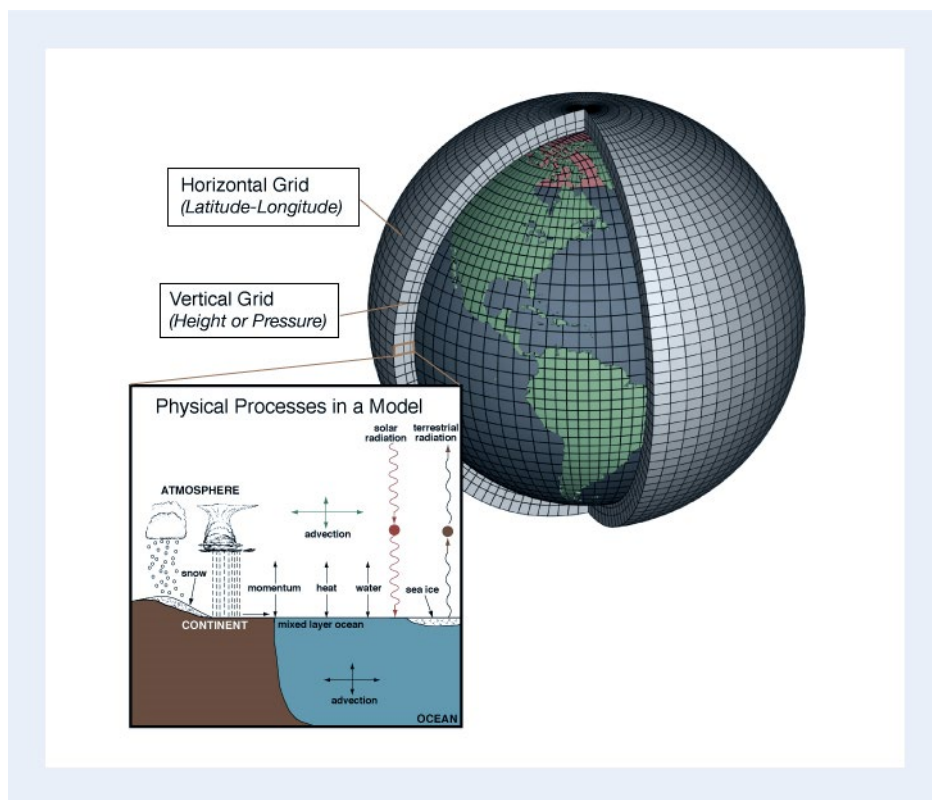


Figure 15. Représentation du fonctionnement des modèles climatiques. Source : [National Oceanic and Atmospheric Administration](#), 2021.

Chaque modèle a ses forces et ses faiblesses. Deux modèles peuvent donner des résultats différents, selon les variables et les équations qui y sont incluses, même si ce sont les conditions climatiques de la même région et durant la même période temporelle qui sont simulées. La combinaison de modèles donne ainsi généralement des résultats plus fiables.

La qualité des modèles climatiques repose sur la capacité des équations mathématiques les composant à représenter fidèlement les processus qui gouvernent le climat. De plus, leur résolution doit être assez précise, mais ne pas nécessiter une performance informatique et un temps de traitement exorbitants. Afin de valider la qualité des simulations réalisées par les modèles climatiques, il importe d'en faire l'évaluation. Le test auquel les modèles sont habituellement soumis est la reproduction des conditions climatiques passées, soit principalement celles observées et mesurées au cours du XX^e siècle. En s'assurant que les modèles simulent correctement le climat passé, on estime qu'ils sont assez précis pour que les résultats de leurs simulations du climat futur soient de qualité. Cependant, la période-test du XX^e siècle est relativement courte et les conditions climatiques n'ont pas varié énormément durant cette période. Il est possible de retourner plus loin dans le passé et de comparer les résultats des modèles aux données du climat calculées à partir d'études paléoclimatiques. Toutefois, comme il n'y a pas d'observations directes provenant de cette époque, les données comparées aux résultats des modèles sont moins précises puisqu'elles sont estimées. Les résultats d'un modèle peuvent aussi être comparés à ceux d'autres modèles reconnus dans la communauté scientifique afin d'en tester la qualité. Aucune méthode d'évaluation ne peut néanmoins annuler complètement toutes les incertitudes liées à la performance des modèles. C'est pourquoi ces derniers sont améliorés continuellement, notamment grâce à l'apport de nouvelles observations de la météo et du climat.

Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre

Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre étant la cause même des changements climatiques, la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est bien sûr un des principaux facteurs inclus dans les modèles climatiques. Afin de réaliser des simulations du climat futur, communément appelées « projections climatiques », les valeurs futures de concentrations de GES sont fournies par des scénarios d'émissions. Ces scénarios décrivent différentes situations futures plausibles en ce qui a trait aux émissions et aux concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces scénarios potentiels dépendent principalement des facteurs socioéconomiques futurs de la société et des décisions politiques qui seront prises. Ils sont donc intrinsèquement tous incertains, bien que certains soient plus probables que d'autres. Il est cependant impossible de déterminer à ce jour quel scénario se concrétisera hors de tout doute. Par conséquent, plus d'un scénario d'émissions de gaz à effet de serre est généralement utilisé dans l'élaboration d'un ensemble de simulations climatiques.

Les scénarios d'émissions de GES reconnus par la communauté scientifique sont sujets à changements avec l'avancement des connaissances en la matière. Une nouvelle mouture de scénarios d'émissions avait d'ailleurs vu le jour entre la publication du quatrième rapport d'évaluation du GIEC en 2007 et le cinquième rapport publié en 2013-2014. Le plus récent rapport, paru en 2021, propose également l'utilisation de nouveaux scénarios, fondés sur

l'évolution potentielle des facteurs anthropiques des changements climatiques, soit les *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP).

Les cinq scénarios SSP ont été développés en extrapolant des choix socioéconomiques en matière d'émissions de GES et le forçage radiatif que chacun cause autour de l'année 2100. Le forçage radiatif, dans le contexte des scénarios d'émissions de GES, représente *grosso modo* la chaleur supplémentaire (exprimée en W/m²) que l'atmosphère retiendra en raison d'une hausse de concentrations atmosphériques de GES. On trouve, en ordre croissant de leur forçage radiatif en 2100 et donc du réchauffement qui en résulterait, les scénarios d'émissions SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5.

Les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6 décrivent les situations les plus optimistes avec des efforts rapides et importants de réduction des émissions de CO₂³⁹. Le SSP1-1.9 prévoit que les émissions nettes de gaz carbonique devront être nulles ou négatives vers 2050. Quant à lui, le SSP1-2.6 illustre une trajectoire d'émission comparable à SSP1-1.9, mais avec l'atteinte d'émissions nulles de CO₂ plus tardivement, vers l'année 2080. Ce scénario est compatible avec l'objectif de maintenir le réchauffement planétaire sous les deux degrés, énoncé dans l'Accord de Paris. Dans ces scénarios, les émissions de CO₂ sont radicalement réduites à compter de 2025. L'atteinte de la carboneutralité à l'échelle mondiale sous-entend un retrait net de CO₂ de l'atmosphère vers la fin du siècle grâce à des technologies de captage et de stockage pour compenser les émissions liées aux activités humaines. L'augmentation de la température moyenne planétaire à l'horizon 2081-2100 par rapport à la période 1850-1900 selon le scénario SSP1-1.9 serait entre 1,0 °C et 1,8 °C, alors qu'elle serait entre 1,3 °C et 2,4 °C selon le scénario SSP1-2.6⁴⁰.

Le scénario SSP2-4.5 représente des situations où les efforts de réduction des émissions de GES au courant du XXI^e siècle sont modérés. Les émissions de CO₂ poursuivent leur croissance encore quelques décennies et commencent à décroître vers 2060. L'augmentation de la température moyenne planétaire à l'horizon 2081-2100 par rapport à la période 1850-1900 selon le scénario SSP2-4.5 serait entre 2,1 °C et 3,5 °C⁴¹.

Les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 décrivent les situations les plus pessimistes dans lesquelles les efforts de réduction des émissions de GES sont très faibles durant le XXI^e siècle. Dans ces scénarios, les émissions de CO₂ croissent intensément et doublent (SSP3-7.0) ou triplent (SSP5-8.5) d'ici 2100. Ces scénarios mènent bien sûr aux plus fortes hausses de la température moyenne planétaire des cinq scénarios à l'horizon 2081-2100 par rapport à la période 1850-1900, soit de 2,8 °C à 4,6 °C pour le SSP3-7.0 et de 3,3 °C à 5,7 °C pour le SSP5-8.5⁴².

³⁹ L'accent est mis dans cette section sur l'évolution possible des émissions et des concentrations atmosphériques du CO₂ seulement puisqu'il s'agit de GES le plus abondant dans l'atmosphère. Les scénarios d'émissions prévoient également les émissions et les concentrations futures des autres GES. Les données sont tirées du dernier rapport du GIEC : IPCC (GIEC), 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

⁴⁰ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁴¹ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁴² IPCC, 2021, *op. cit.*

Comme il est possible de le constater, l'utilisation de différents scénarios d'émissions de GES lors de l'élaboration de simulations climatiques permet de couvrir un éventail de possibilités, de la plus optimiste à la plus pessimiste. Les scénarios demeurent sujets à modifications avec le temps, tout comme notre perception de ceux-ci. Un scénario d'émissions de GES aujourd'hui qualifié de pessimiste pourrait devenir un scénario plutôt optimiste dans l'avenir selon l'évolution réelle des émissions ou la sensibilité du climat terrestre à celles-ci. Comme le montrent les scénarios, l'avenir des émissions et des concentrations atmosphériques de GES dépendra de l'effort de réduction qui y sera consenti et du leadership politique en la matière.

Tableau 5. Variation de la température planétaire moyenne selon les cinq scénarios SSP par rapport à la période 1850-1900. Source : IPCC, 2021, p. SPM-18.

Scénario	Court terme - 2021-2040		Moyen terme - 2041-2060		Long terme - 2081-2100	
	Meilleure estimation (°C)	Plage très probable (°C)	Meilleure estimation (°C)	Plage très probable (°C)	Meilleure estimation (°C)	Plage très probable (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 à 1,7	1,6	1,2 à 2,0	1,4	1,0 à 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 à 1,8	1,7	1,3 à 2,2	1,8	1,3 à 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 à 1,8	2,0	1,6 à 2,5	2,7	2,1 à 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 à 1,8	2,1	1,7 à 2,6	3,6	2,8 à 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 à 1,9	2,4	1,9 à 3,0	4,4	3,3 à 5,7

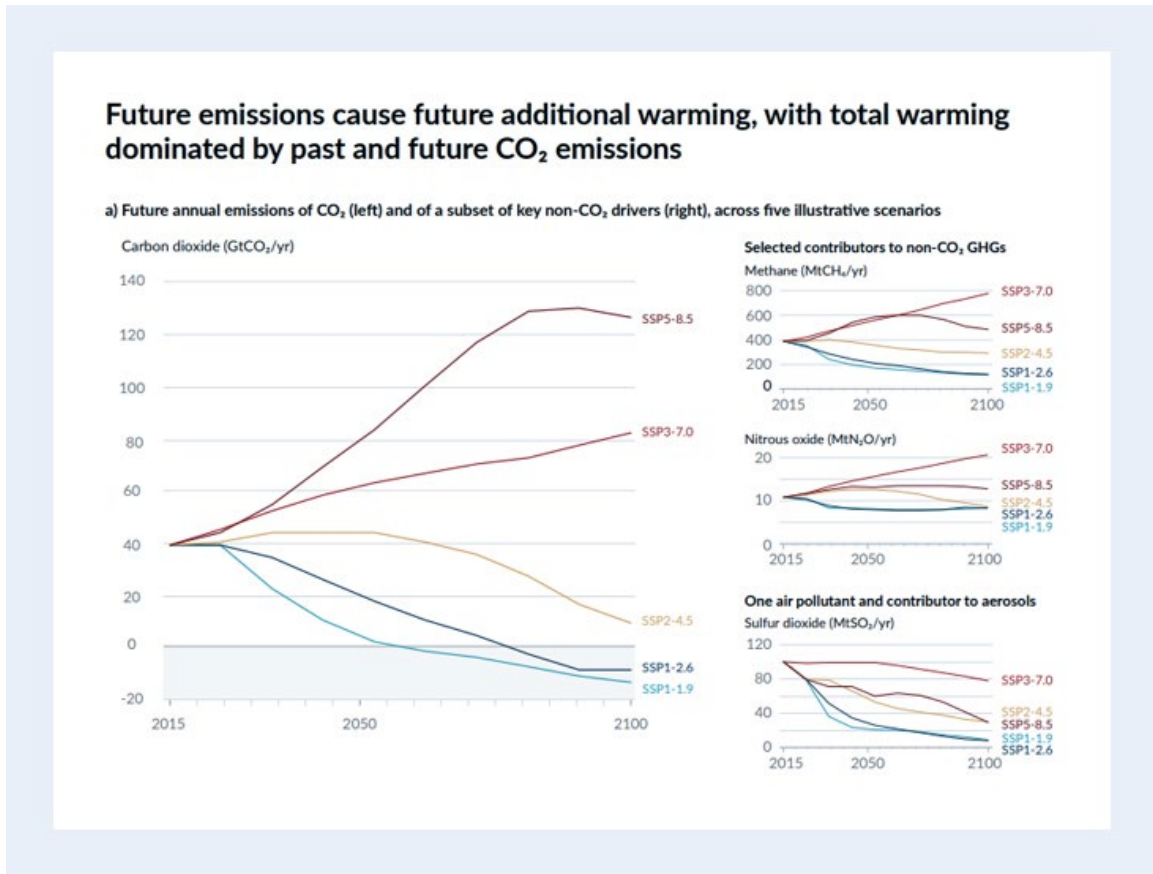


Figure 16. Évolution des principaux gaz à effet de serre pour les différents scénarios d'émissions de GES. Source : [IPCC, 2021](#).

Projections climatiques en bref

Les tendances climatiques présentées dans la section *Quelques changements climatiques observés* permettent de constater que des transformations sont déjà en cours tout autour du globe. Il devient donc impératif de tenter de prévoir ce que l'avenir climatique nous réserve afin de pouvoir s'y préparer et s'y adapter. À ce sujet, tel qu'abordé dans la section précédente, l'utilisation de modèles climatiques couplée à celle de scénarios d'émissions de GES permet de faire des projections⁴³ du climat futur.

En ce qui concerne la température à la surface de la Terre, une hausse est attendue à l'échelle planétaire, peu importe le scénario d'émissions. À court terme, pour l'horizon 2021-2040, les différences de température projetées entre les scénarios sont faibles. D'après tous les scénarios, il est probable que la température moyenne à court terme excède de 1,5 °C celle de la période 1850-1900. En raison de la variabilité naturelle du climat, la température globale de surface peut dépasser, pour une année donnée, la tendance à long terme de la hausse attendue de

⁴³ Un accent est mis dans cette section sur les prévisions concernant la température et les précipitations seulement.

température⁴⁴. Pour la deuxième moitié du XXI^e siècle, la magnitude des changements climatiques sera fortement influencée par l'évolution des émissions anthropiques de GES puisque les projections pour cette période fluctuent intensément en fonction du choix de scénarios d'émissions dans les modèles. Il est probable que la température moyenne planétaire pour la période 2081-2100 soit de 1 °C à 5,7 °C plus élevée que pour la période 1850-1900, selon l'évolution des émissions de GES⁴⁵. Le réchauffement planétaire continuera aussi de montrer des variations interannuelles et interdécennales et de ne pas être uniforme régionalement⁴⁶. Par exemple, le réchauffement de l'Arctique continuera d'être plus rapide qu'ailleurs et le réchauffement au-dessus des continents sera plus intense que celui au-dessus des océans.

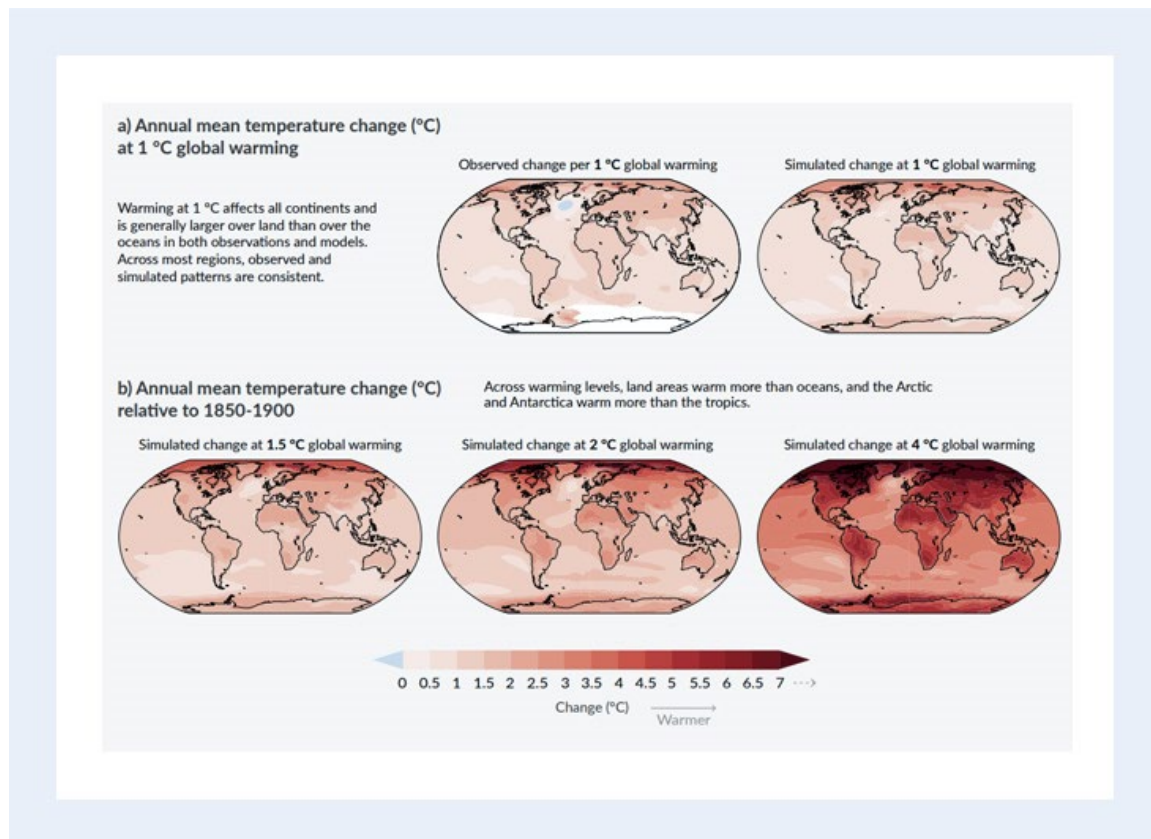


Figure 17. Cartographie des variations projetées de la température moyenne à la surface de la Terre selon différents scénarios d'augmentation de la température moyenne planétaire. Source : IPCC, 2021.

Le Québec continuera de subir lui aussi un important réchauffement. Selon les modèles, la température moyenne pour la période 2071-2100 pourrait être de 2 °C à 10 °C plus élevée que

⁴⁴ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁴⁵ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁴⁶ IPCC, 2021, *op. cit.*

celle pour la période 1971-2000⁴⁷. Tout comme pour la planète, le réchauffement ne sera pas uniforme partout au Québec. La hausse des températures sera plus élevée dans le centre et dans le nord du Québec que dans le sud du Québec, où l'on retrouve la majorité de la population, et dans la région du golfe du Saint-Laurent⁴⁸.

Il est aussi pratiquement certain qu'il y aura davantage d'épisodes de températures extrêmes chaudes à travers le globe à mesure que la température moyenne planétaire augmentera⁴⁹. Il est très probable que les canicules seront plus fréquentes et plus longues, y compris au Québec. Des épisodes de froid extrême l'hiver continueront tout de même de survenir.

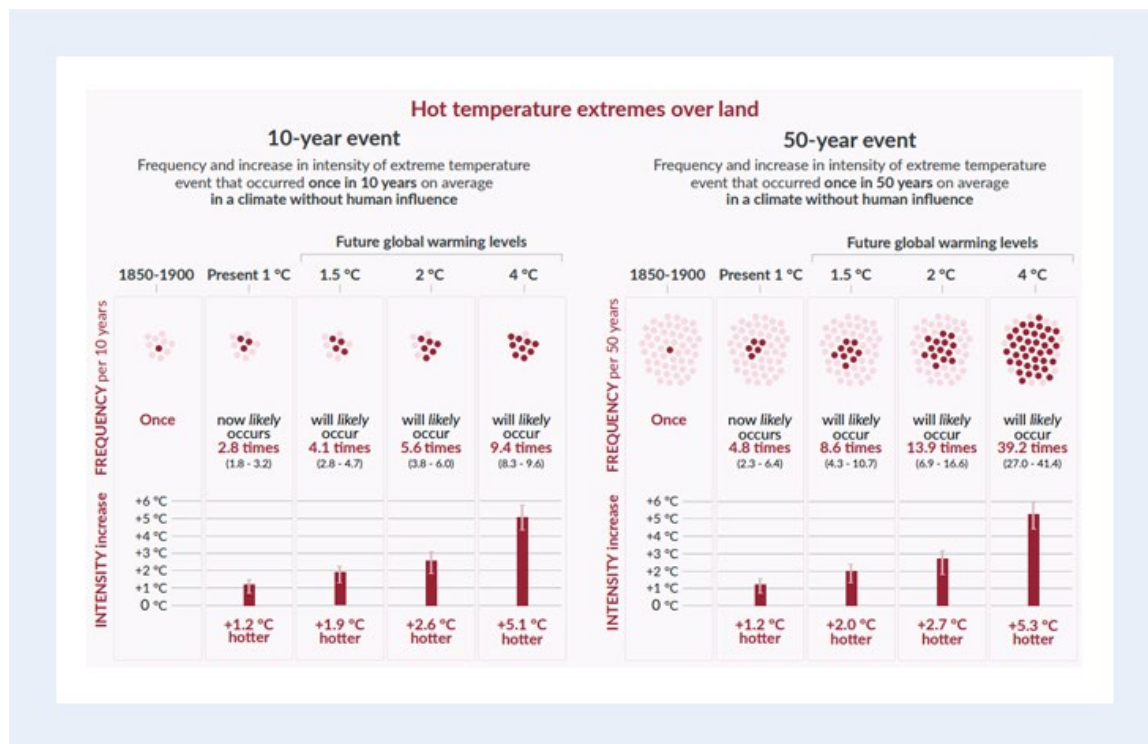


Figure 18. Projections de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des températures extrêmes chaudes corrélée avec la hausse de la température moyenne planétaire par rapport à la situation préindustrielle. Source : IPCC, 2021.

En ce qui a trait au cycle de l'eau régissant les précipitations, il est pratiquement certain qu'il s'intensifiera avec la hausse des températures moyennes. Les changements le concernant au cours du XXI^e siècle ne seront pas non plus uniformes à travers la planète⁵⁰. La hausse des températures intensifiera les conditions météorologiques de grandes sécheresses et de grandes précipitations. L'écart dans la quantité de précipitations reçues entre les régions humides et les

⁴⁷ Ouranos, *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*, Edition 2015, Montréal, Québec : Ouranos, 2015, 415 p.

⁴⁸ Voir les délimitations des zones de référence utilisées par le consortium Ouranos dans : Ouranos, 2015, *op. cit.* p. 2.

⁴⁹ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁵⁰ IPCC, 2021, *op. cit.*

régions sèches et entre les saisons humides et les saisons sèches augmentera, bien qu'il puisse y avoir des exceptions régionales. Les régions des hautes latitudes, les régions équatoriales du Pacifique et certaines régions touchées par les moussons devraient recevoir davantage de précipitations à la fin du XXI^e siècle. À l'opposé, les précipitations moyennes annuelles devraient diminuer dans certaines régions subtropicales et tropicales. À mesure que la température moyenne planétaire augmentera, il est très probable que les épisodes de précipitations extrêmes continuent de devenir plus intenses et plus fréquents dans plusieurs zones du globe⁵¹.

Au Québec⁵², les modèles climatiques s'accordent sur des hausses de précipitations hivernales et printanières pour toutes les régions au cours des prochaines décennies. Pour le nord et le centre du Québec, les modèles montrent aussi des augmentations des précipitations en été et en automne, mais plus modestes. Pour le sud du Québec et le golfe du Saint-Laurent, il n'y a cependant pas de tendances futures claires des précipitations pour ces deux saisons. Une hausse des précipitations totales sur l'ensemble de l'année est tout de même attendue dans toutes les régions du Québec.

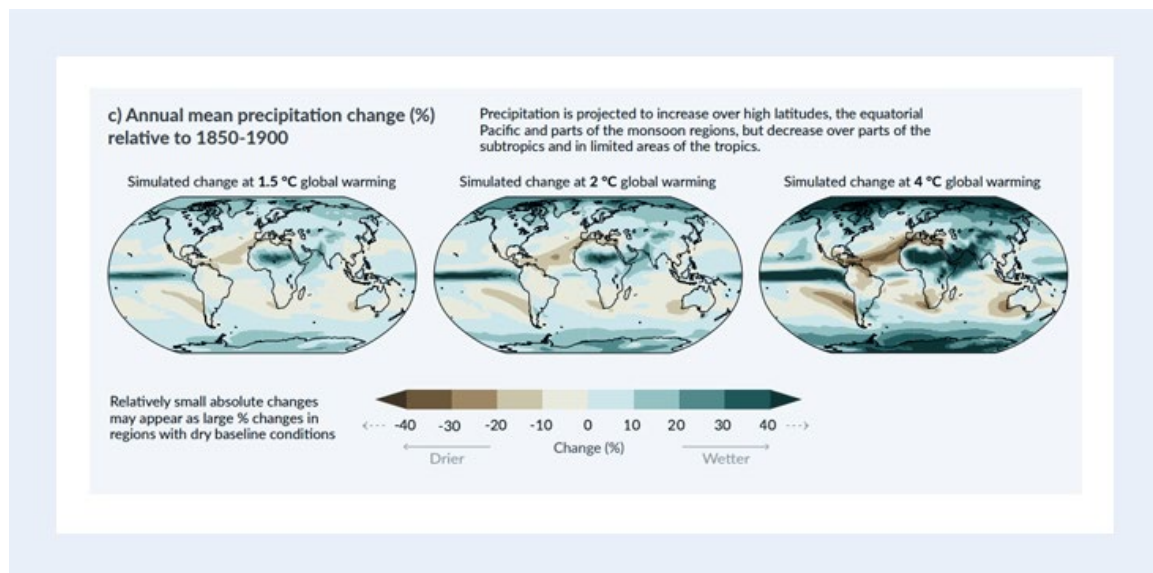


Figure 19. Cartographie des variations projetées des précipitations moyennes annuelles selon différents scénarios d'augmentation de la température moyenne planétaire. Source : IPCC, 2021.

En somme, les simulations climatiques montrent que les émissions cumulées de GES détermineront largement le réchauffement moyen de la surface de la planète et la magnitude des autres modifications du climat d'ici la fin du XXI^e siècle et au-delà. La plupart des différents aspects des changements climatiques persisteront pendant de nombreux siècles même si les émissions de GES sont arrêtées. Les répercussions des changements climatiques seront donc irréversibles sur une échelle temporelle de plusieurs centaines voire de plusieurs milliers d'années, excepté dans l'éventualité où il y aurait un retrait net considérable de GES de l'atmosphère sur une période prolongée.

⁵¹ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁵² Ouranos, 2015, *op. cit.*

1.5 CONSÉQUENCES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les changements actuels et futurs du climat ont déjà et auront d'innombrables répercussions⁵³ tout autour du globe sur les aspects physique et biologique de notre environnement⁵⁴.

Aspect physique

Événements météorologiques extrêmes

Les événements météorologiques extrêmes, comme les cyclones, les sécheresses et les inondations, sont des phénomènes plutôt inhabituels. Ils sont, comme leur nom l'indique, extrêmes, que ce soit, notamment, dans leur intensité ou leurs conséquences. Un climat changeant peut mener à des modifications dans la fréquence, l'intensité, l'étendue spatiale, la durée et le moment où surviennent des événements météorologiques extrêmes⁵⁵. Il peut être difficile de départager le rôle de la variabilité naturelle du climat et celui des changements climatiques causés par l'humain dans ces événements. Toutefois, des changements sont observés pour certains de ces événements extrêmes et ne peuvent être entièrement imputés à des variations naturelles du climat⁵⁶. Les données demeurent limitées pour établir clairement les tendances concernant les événements extrêmes.

Comme il a été mentionné dans le volet *Quelques changements climatiques observés*, une hausse du nombre de journées chaudes et une diminution du nombre de journées froides⁵⁷ à l'échelle planétaire ont été observées depuis le milieu du XX^e siècle. Durant la même période, plusieurs régions terrestres ont connu une augmentation du nombre d'épisodes de précipitations extrêmes⁵⁸.

La fréquence des canicules a augmenté dans la plupart des régions terrestres depuis le milieu du XX^e siècle. Certains de ces événements survenus lors de la dernière décennie auraient été extrêmement improbables sans les changements climatiques induits par les humains⁵⁹. De plus, certains endroits dans le monde, comme le sud de l'Europe et l'Afrique de l'Ouest, expérimentent des sécheresses plus intenses et plus longues⁶⁰. Certaines régions connaîtront également une augmentation de la fréquence de fortes pluies qui sont associées aux

⁵³ La présente section brosse un portrait non exhaustif des principales d'entre elles.

⁵⁴ Les principales répercussions directes sur les sociétés humaines seront quant à elles abordées dans une note d'information subséquente sur le thème des changements climatiques.

⁵⁵ IPCC (GIEC), 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

⁵⁶ IPCC, 2021 (GIEC), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

⁵⁷ Journées au cours desquelles la température est supérieure au 90^e centile de la distribution des températures mesurées durant la période de référence de 1961 à 1990 pour les journées chaudes et inférieure au 10^e centile pour les journées froides.

⁵⁸ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁵⁹ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁶⁰ IPCC, 2012, *op. cit.*

inondations⁶¹. C'est le cas de la plupart des régions d'Afrique, d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie.

Le niveau de certitude est cependant faible concernant les tendances à long terme de l'évolution de l'activité des cyclones⁶² au cours du dernier siècle. Il est tout de même probable que la fréquence des cyclones majeurs a augmenté depuis 1970, et que les changements climatiques amplifient les fortes précipitations associées aux cyclones tropicaux⁶³.

Les tendances observées jusqu'à maintenant concernant les différents événements météorologiques extrêmes devraient se poursuivre et s'amplifier de manière corrélée avec l'augmentation des températures moyennes d'ici la fin du XXI^e siècle⁶⁴. Il faut donc s'attendre à une intensification, entre autres, des canicules, des épisodes de précipitations hors norme, des sécheresses et des cyclones dans plusieurs régions du globe. Ces événements météorologiques ont, à leur tour, des répercussions considérables, que ce soit sur les écosystèmes en général ou sur l'humanité et ses infrastructures en particulier.

*Cryosphère*⁶⁵

L'ensemble de la cryosphère est affecté par les changements climatiques et, particulièrement, par la hausse de la température planétaire qui en découle. D'abord, la glace de mer dans l'océan Arctique subit une fonte majeure depuis plusieurs décennies. En général, la superficie maximale annuelle de la banquise arctique est atteinte en mars et la superficie minimale annuelle l'est en septembre⁶⁶. Par décennie, elles ont rétréci respectivement de 2,6 %⁶⁷ et de 13,1 %⁶⁸ entre 1979 et 2020. De plus, la portion permanente de la banquise arctique, c'est-à-dire celle qui perdure d'année en année sans fondre au printemps et se reformer chaque automne, diminue. En mars 1985, la portion de la banquise qui avait perduré au moins quatre années sans fondre représentait 33 % de la superficie maximale de la banquise, alors qu'en mars 2019, cette portion ne représentait qu'un peu plus de 1 %⁶⁹. Cela fait en sorte que l'épaisseur de la banquise diminue également puisque l'épaisseur de la glace de mer augmente avec son « âge ». Une étude de 2009⁷⁰ a d'ailleurs estimé que l'épaisseur moyenne de la banquise arctique en hiver avait diminué de 3,64 mètres en 1980 à 1,89 mètre en 2008. Selon de récentes projections⁷¹, il se pourrait qu'il n'y ait plus de glace de mer l'été en Arctique aussi tôt qu'en 2035. Un couvert de glace hivernale devrait tout de même continuer de se former chaque année pour encore plusieurs décennies. La fonte de la banquise arctique a des effets considérables sur les écosystèmes de cet environnement polaire. De plus, comme illustré précédemment dans cette

⁶¹ IPCC, 2021, *op. cit.*, p. SPM-32.

⁶² Désigne aussi les ouragans et les typhons.

⁶³ IPCC, 2021, *op. cit.*, p. SPM-11.

⁶⁴ IPCC, 2021, *op. cit.*, p. SPM-19.

⁶⁵ Ensemble des eaux et des sols gelés à la surface de la Terre.

⁶⁶ Une portion importante de la banquise fond chaque printemps/été et se reforme chaque automne/hiver. Cela fait ainsi en sorte qu'une superficie minimale de la banquise est atteinte annuellement autour de septembre et qu'une superficie maximale est atteinte, quant à elle, autour de mars.

⁶⁷ National Snow and Ice Data Center. 2020. [Arctic Sea Ice News and Analysis - Monthly archives : April 2020](#).

⁶⁸ National Snow and Ice Data Center. 2020. [Arctic Sea Ice News and Analysis - Monthly archives : October 2020](#).

⁶⁹ National Snow and Ice Data Center, [All About Sea Ice – Multiyear Ice](#).

⁷⁰ Kwok & Rothrock, "Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008", *Geophysical Research Letters*, 2009.

⁷¹ Voir notamment l'étude de Guarino *et al.*, 2020, publiée dans la revue *Nature Climate Change*.

note, la fonte de la banquise arctique contribue à diminuer l'albédo de la région et, par conséquent, à en accroître fortement le réchauffement.

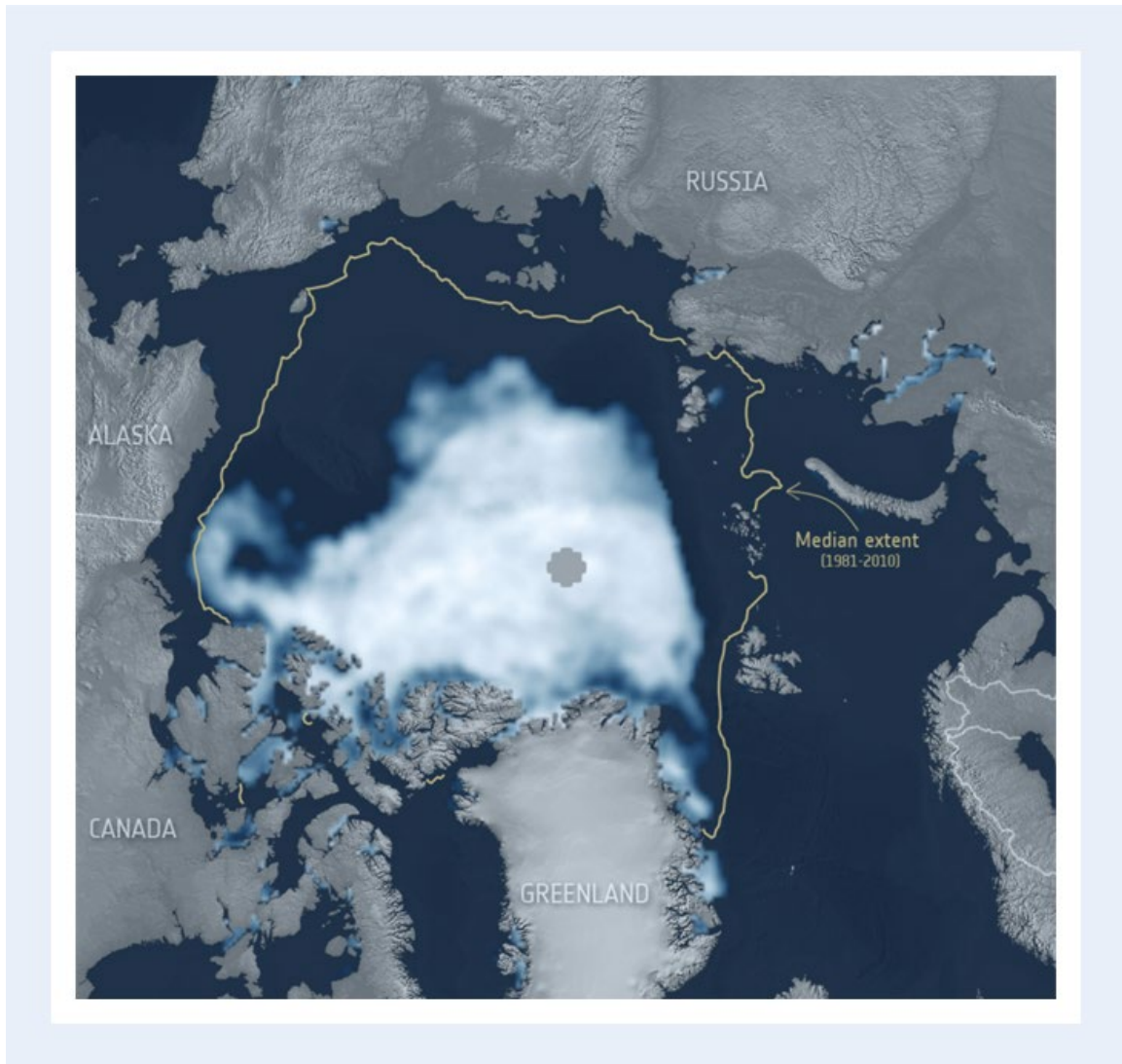


Figure 20. Superficie de l'océan Arctique couverte par la banquise en août 2020 (blanc) comparativement à l'étendue couverte médiane entre 1981 et 2010 (ligne jaune). Source : [European Space Agency, 2020](#).

Du côté opposé du globe, au pôle Sud, la banquise présente dans l'océan Austral tout autour du continent antarctique est formée majoritairement de glace de mer dite « saisonnière », c'est-à-dire qu'elle fond chaque printemps et se reforme chaque automne. Contrairement à la banquise arctique, l'évolution de la banquise antarctique ne suit pas de tendance claire⁷².

⁷² National Oceanic and Atmospheric Administration, [Understanding climate: Antarctic sea ice extent](#).

Les changements climatiques n'ont pas des effets que sur la portion océanique de la cryosphère. La portion terrestre est aussi affectée. En effet, les inlandsis⁷³ du Groenland et de l'Antarctique subissent une fonte importante, tout comme les autres glaciers présents en milieu polaire ou sur le sommet des montagnes autour du globe. De plus, cette fonte s'accélère. Par exemple, le taux moyen de fonte de glace de l'inlandsis du Groenland a été multiplié par un facteur huit en un peu plus de vingt ans, de 34 Gt⁷⁴ par année durant la période 1992-2001⁷⁵ à 278 Gt par année pour 2006-2015⁷⁶. Selon les modèles climatiques, il est attendu que la masse des glaciers sur la planète diminuera de façon draconienne, entre 11 % et 47 %, d'ici la fin du présent siècle⁷⁷. En plus d'influencer l'albédo de la surface de la Terre, la fonte des glaciers et des inlandsis contribue grandement à la hausse du niveau de la mer.

La couverture neigeuse a également diminué depuis le début du XX^e siècle. Celle dans l'hémisphère nord, qui représente 98 % du couvert de neige de l'ensemble de la Terre⁷⁸, durant le printemps (mars et avril) a notamment diminué de 290 000 km² par décennie en moyenne depuis 1922⁷⁹. Les modèles climatiques prévoient que la réduction de la couverture neigeuse ne s'arrêtera pas là. En effet, selon les modèles, avec le réchauffement qui s'accroîtra, la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord durant le printemps devrait diminuer de 8 % par degré Celsius d'augmentation de la température moyenne planétaire par rapport à la couverture neigeuse moyenne de 1995-2014⁸⁰. Le couvert de neige, tout comme la banquise et les glaciers, joue un rôle majeur dans la régulation du climat par son effet sur l'albédo de la surface de la planète. La réduction de la couverture neigeuse a donc des conséquences importantes sur le réchauffement planétaire.

Par ailleurs, le pergélisol⁸¹, sol gelé en permanence couvrant environ le quart de la surface de l'hémisphère nord⁸² et près de la moitié de la surface du Canada⁸³, subit aussi les effets des changements climatiques. Une hausse de la température du pergélisol est observée dans plusieurs régions ainsi que son dégel, en conséquence. Par exemple, sa au Canada a augmenté en moyenne jusqu'à 1 °C par décennie depuis 2000⁸⁴. Son dégel amène son lot de répercussions à son tour, notamment l'affaiblissement des sols et l'accroissement de leur instabilité, ayant des

⁷³ Glacier continental de très grande superficie.

⁷⁴ Gigatonnes.

⁷⁵ IPCC (GIEC), 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

⁷⁶ IPCC (GIEC), 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

⁷⁷ IPCC, 2019, *op. cit.*

⁷⁸ National Snow and Ice Data Center. 2020. [All About Snow - Snow and Climate](#).

⁷⁹ IPCC, 2021, *op. cit.*, p. 2-67.

⁸⁰ Mudryk, L. *et al.*, "[Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi28 model ensemble](#)", *The Cryosphere*, 14, 2020.

⁸¹ Sol qui se maintient à une température égale ou en dessous de 0°C pendant au moins deux ans.

⁸² Zhang *et al.*, "[Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere](#)".

Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, 2003.

⁸³ Derksen, C. *et al.*, "Changes in snow, ice, and permafrost across Canada, Chapter 5", *Canada's Changing Climate Report*, Government of Canada, Ottawa, 2019, p. 194-260.

⁸⁴ Derksen, C. *et al.* 2019, *op. cit.*

conséquences majeures pour les infrastructures, ainsi que l'émanation de GES qui étaient emprisonnés dans le sol. Il apparaît difficile de prédire l'évolution de l'état du pergélisol pour les prochaines décennies en raison, entre autres, de la complexité de bien représenter les propriétés du sol dans les modèles. Toutefois, certains modèles prévoient une diminution de la superficie couverte par le pergélisol au Canada de 16 % à 20 % d'ici la fin du XXI^e siècle⁸⁵.

Milieux marins et côtiers

Comme il a été mentionné précédemment, les océans exercent un effet tampon puissant sur le climat puisqu'ils absorbent une grande quantité de chaleur emmagasinée dans l'atmosphère. En raison de la hausse des concentrations atmosphériques de GES, de l'accumulation de chaleur supplémentaire dans l'atmosphère et du transfert d'une partie de cet excédent de chaleur vers les océans, ces derniers voient alors leur température augmenter tout comme celle de l'atmosphère. En conséquence, la température des océans a crû dans, au moins, les 700 premiers mètres de profondeur⁸⁶. Celle des eaux de surface a notamment augmenté de 0,88 °C en moyenne dans l'ensemble des océans entre la période 1850-1900 et celle de 2011-2020, et de 0,60 °C entre 1980 et 2020 seulement⁸⁷. Les modèles climatiques prévoient que le réchauffement se poursuivra au cours du XXI^e siècle et au-delà, atteignant, en 2100, des températures moyennes en surface de 0,86 °C à 2,89 °C plus élevées que celles au début du XXI^e siècle, selon les scénarios⁸⁸. De plus, les scientifiques s'attendent à ce qu'une partie importante de la chaleur absorbée par les océans soit retournée éventuellement dans l'atmosphère. Cela exacerbera alors grandement le réchauffement de l'atmosphère en raison de la quantité considérable de chaleur stockée par les océans jusqu'à maintenant⁸⁹.

La hausse du niveau de la mer est une autre conséquence majeure des changements climatiques. Les deux causes principales de cette élévation du niveau des océans sont la dilatation thermique⁹⁰ découlant du réchauffement de l'eau des océans et l'apport d'eau résultant de la fonte des glaciers et des inlandsis. Il faut noter que la fonte de la glace de mer, quant à elle, ne joue aucun rôle dans la hausse du niveau de la mer⁹¹. Entre 1902 et 2015, le niveau moyen de la mer a augmenté d'environ 16 cm⁹². De plus, la hausse du niveau de la mer semble s'accélérer, probablement puisque la fonte des glaciers et des inlandsis s'accélère aussi. Le taux d'élévation moyen du niveau de la mer pour la période 2006-2015 de 3,6 mm par année a été 2,5 fois plus important que celui de la période 1901-1990, qui était de 1,4 mm par année⁹³. Les modèles climatiques prévoient que la hausse du niveau de la mer se poursuivra au cours du XXI^e siècle. D'après ces modèles, on pourrait s'attendre à ce que le niveau moyen de la mer augmente de

⁸⁵ *Op. cit.*

⁸⁶ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁸⁷ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁸⁸ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁸⁹ National Oceanic and Atmospheric Administration. 2020. [Climate Change: Ocean Heat Content](#).

⁹⁰ Augmentation du volume d'une substance causée par l'augmentation de sa température.

⁹¹ Le volume que la glace de mer occupe, sous forme gelée, dans la mer est le même qu'elle occupe si elle fond. Comme cette glace est déjà dans la mer, le volume total demeure le même lorsque cette glace fond. À l'inverse, la fonte des glaciers et inlandsis, présents sur les continents, augmente le volume des océans et, donc, le niveau de la mer.

⁹² IPCC, 2019, *op. cit.*

⁹³ IPCC, 2019, *op. cit.*

43 cm à 84 cm selon les scénarios d'émissions de GES⁹⁴. Cette hausse a bien sûr des répercussions non négligeables, entre autres, pour les villes situées près du niveau de la mer actuel et pour l'érosion des berges.

En ce qui concerne la salinité de la mer, il n'y a pas de tendance globale qui prime sur l'ensemble des océans en raison des changements climatiques. Des tendances régionales opposées sont plutôt observées. Les régions océaniques aux moyennes latitudes, où une évaporation relativement forte est présente, ont vu leur salinité de surface augmenter, alors qu'à l'inverse, les régions tropicales et polaires, où on trouve davantage de précipitations, l'ont vu diminuer en raison de l'apport d'eau douce plus important⁹⁵. De telles tendances régionales devraient se poursuivre au cours du présent siècle selon les modèles⁹⁶.

Comme abordé précédemment dans cette note, les océans absorbent aussi une quantité non négligeable de dioxyde de carbone. Ils exercent donc un effet tampon sur le climat à cet égard, puisqu'ils réduisent la quantité de ce gaz qui s'accumule dans l'atmosphère. Il est d'ailleurs estimé que les océans ont absorbé entre 20 % et 30 % du CO₂ émis par les activités humaines depuis 1980⁹⁷. L'absorption de CO₂ par les océans n'est toutefois pas sans conséquence. De fait, en raison d'une série de réactions chimiques entre les molécules de CO₂ et d'eau à la suite de la dissolution du CO₂ dans l'eau de mer, la concentration d'ions H⁺⁹⁸ augmente dans les océans. Par conséquent, l'acidité des océans croît. L'acidité de l'eau est mesurée par le pH, paramètre fondé sur la concentration d'ions H⁺ et ayant une valeur entre 0 et 14. Un pH faible correspond à une eau acide, alors qu'un pH élevé correspond à une eau basique. Depuis la fin des années 1980, le pH des eaux de surface des océans a diminué de 0,017 à 0,027 unité de pH par décennie⁹⁹. Il est attendu que l'absorption de CO₂ se poursuive au cours du XXI^e siècle, ce qui aura pour effet d'exacerber l'acidification des océans. La baisse du pH des eaux de surface entre le début et la fin du présent siècle pourrait atteindre jusqu'à 0,3 unité de pH¹⁰⁰. Les organismes marins, surtout ceux qui produisent une enveloppe ou une carapace de calcaire¹⁰¹, sont principalement affectés par l'acidification des océans. Une eau acide a pour effet de dissoudre le carbonate de calcium composant le calcaire, influençant ainsi négativement la survie de ces organismes.

L'érosion des berges constitue un important enjeu de gestion du territoire côtier découlant des changements climatiques. D'abord, l'érosion côtière ou des berges consiste en l'usure et en la dégradation du substrat composant les berges par l'action de l'eau de mer. Ce processus fait en sorte que la matière composant les berges se détache et est emportée par l'eau sous la forme de particules fines. L'érosion des berges mène donc à la disparition de plages, de bandes riveraines ainsi que d'habitats fauniques et floristiques côtiers. Elle a aussi des conséquences non négligeables sur les infrastructures et terrains situés près des côtes. L'érosion des berges peut aussi entraîner une dégradation de la qualité de l'eau causée par l'augmentation des particules

⁹⁴ IPCC, 2019, *op. cit.*

⁹⁵ NASA Science, 2021, [Salinity](#).

⁹⁶ IPCC, 2021, *op. cit.*

⁹⁷ IPCC, 2019, *op. cit.*

⁹⁸ Hydrogène.

⁹⁹ IPCC, 2019, *op. cit.*

¹⁰⁰ IPCC, 2019, *op. cit.*

¹⁰¹ Par exemple : palourdes, huîtres, pétoncles, moules, coraux, étoiles de mer, oursins et différentes espèces de plancton.

en suspension. Durant les dernières décennies, la hausse du niveau de la mer et une fréquence plus élevée de tempêtes ont contribué à augmenter l'activité de l'érosion des berges dans plusieurs régions côtières à travers le monde¹⁰². C'est le cas au Québec, surtout dans les régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine, où l'érosion littorale est une problématique majeure¹⁰³. On anticipe que cette érosion s'accroîtra au cours des prochaines décennies, au Québec comme ailleurs, avec la poursuite de la hausse du niveau de la mer. L'accroissement des effets des tempêtes sur les berges, notamment en raison de la réduction prévue du couvert de glace côtier qui protège généralement les berges une partie de l'année dans certaines régions comme le Québec, y jouera un rôle crucial également¹⁰⁴.

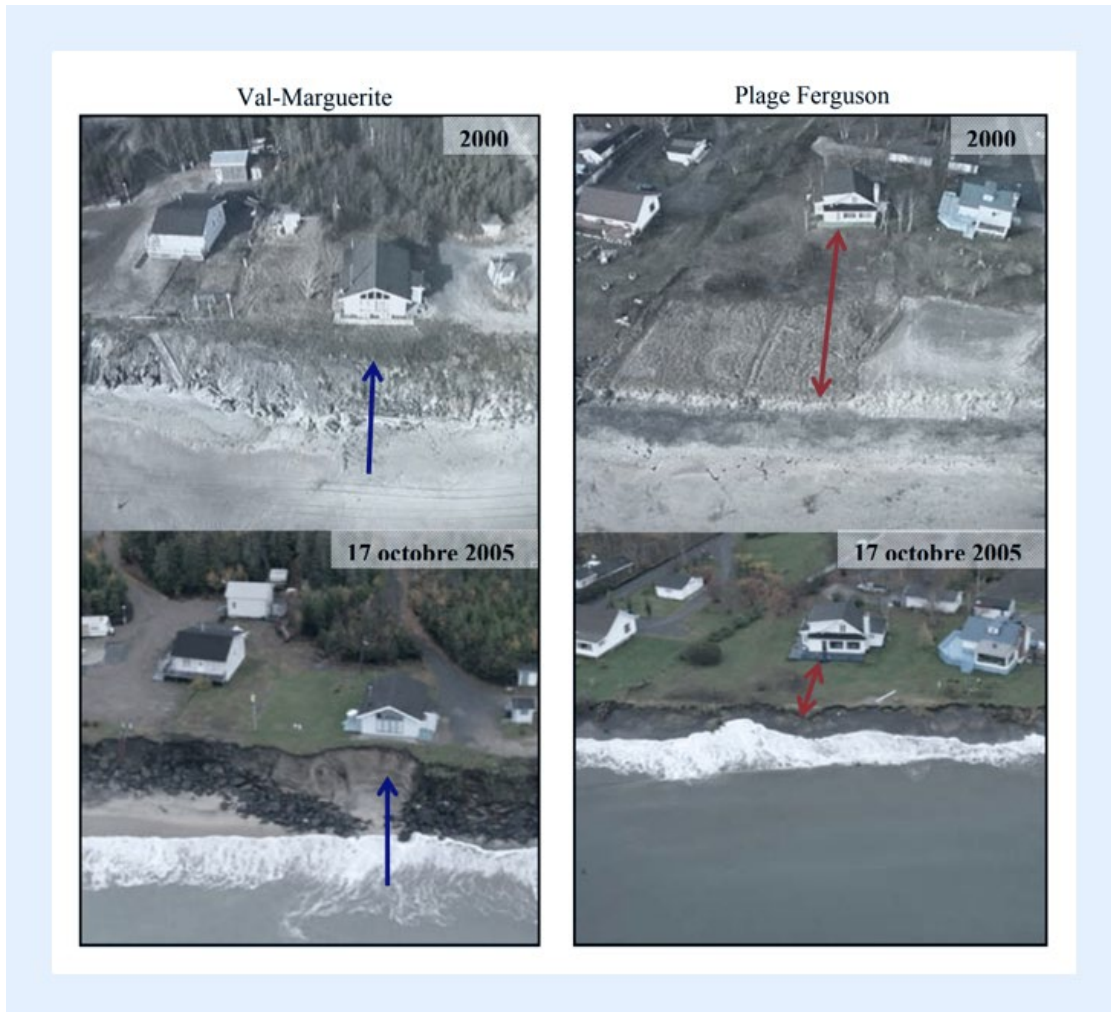


Figure 21. Exemples de l'action de l'érosion sur des berges de la région de Sept-Îles.

Source : Bernatchez et al., 2008.

Feux de forêt

¹⁰² IPCC, 2012, *op. cit.*

¹⁰³ Ouranos, *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*, Edition 2015, Montréal, Québec : Ouranos, 2015, 415 p.

¹⁰⁴ Ouranos, 2015, *op. cit.* et IPCC, 2012, *op. cit.*

Les feux de forêt peuvent avoir des conséquences à la fois bénéfiques et catastrophiques. D'un côté, les feux naturels aident à la régénération du couvert forestier et au maintien d'un sol fertile. Certaines espèces de conifères dépendent même des feux de forêt pour leur reproduction. D'un autre côté, les feux de forêt, dont 70 % sont imputables à l'activité humaine¹⁰⁵, peuvent représenter une menace sérieuse pour les écosystèmes et pour les communautés lorsque ceux-ci surviennent près de zones habitées. Cela est sans compter les effets nuisibles possibles sur l'industrie forestière. La fréquence accrue de canicules et, parfois, de sécheresses qui accompagne la hausse des températures dans certaines régions du monde depuis plusieurs décennies entraîne une augmentation du risque de feux de forêt et, dans certains cas, un allongement de la saison des feux¹⁰⁶. C'est le cas à certains endroits au Canada, notamment en Alberta et en Saskatchewan¹⁰⁷. Des épisodes de canicule, comme ceux survenus à l'été 2021 en Colombie-Britannique où un nouveau record de température pour le Canada de 49,6 °C a été enregistré, sont l'illustration de cette tendance. Ce genre d'événement météorologique aurait été improbable sans les changements climatiques qui en augmentent le risque par au moins 150 fois. Si la température mondiale augmentait de 2 °C d'ici 2050, de telles situations pourraient se reproduire tous les cinq à dix ans¹⁰⁸. Les prévisions climatiques pour le Canada d'ici la fin du présent siècle anticipent une hausse de la température et une hausse des précipitations. Toutefois, la hausse des précipitations ne serait pas suffisante pour compenser celle de la température, entraînant donc des conditions plus sèches favorables aux feux de forêt¹⁰⁹. Pour le Québec et les provinces de l'est du Canada, la saison des feux pourrait s'allonger, et le nombre de feux et la superficie brûlée annuellement pourraient augmenter considérablement d'ici la fin du XXI^e siècle¹¹⁰. Ces changements anticipés constituent ainsi un autre enjeu majeur pour la gestion du territoire au cours des prochaines décennies.

Aspect biologique

Habitats

Les différentes répercussions des changements climatiques sur l'aspect physique de l'environnement, dont plusieurs sont décrites dans la sous-section précédente, ont par conséquent des effets majeurs sur les habitats¹¹¹ des organismes vivants à travers le globe, qu'ils soient terrestres ou aquatiques. En effet, certains habitats s'en retrouvent fortement modifiés et même, dans certains cas, détruits. Voici quelques exemples d'habitats altérés par les changements climatiques et certaines conséquences collatérales qui en résultent :

- Comme abordé à quelques reprises dans cette note, la banquise arctique fond à un rythme effréné depuis plusieurs décennies. Cela n'est pas sans répercussions pour les

¹⁰⁵ Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU). 2021. [Organisation](#).

¹⁰⁶ Bush, E. and Lemmen, D.S., editors (2019): *Canada's Changing Climate Report*, Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p.

¹⁰⁷ *Ibid.*

¹⁰⁸ World Weather Attribution, [Western North American extreme heat virtually impossible without human-caused climate change](#), 7 juillet 2021.

¹⁰⁹ Lajoie, G., 2017. Impacts des feux de forêt sur le secteur forestier québécois dans un climat variable et en évolution. Montréal, QC, CA, Ouranos.

¹¹⁰ *Ibid.*

¹¹¹ Partie de l'environnement définie par un ensemble de facteurs physiques dans laquelle vit une espèce ou un groupe d'espèces.

espèces arctiques qui en dépendent et qui voient alors leur habitat se modifier. En effet, plusieurs espèces utilisent la glace de mer pour certaines de leurs activités, que ce soit, entre autres, chez certains poissons pour se cacher de leurs prédateurs aviaires, chez les ours polaires pour chasser leur proie (phoque) ou chez les phoques pour mettre bas. De plus, la glace de mer constitue un habitat complet pour certaines espèces dites « sympagiques ». Il s'agit d'organismes qui vivent directement dans les interstices de la glace de mer ou tout juste sous celle-ci. Dans le cas de ces organismes, la fonte de la banquise consiste donc en une perte directe d'habitat. Ainsi, la fonte de la banquise affecte lourdement ces différentes espèces et les amène, pour certaines, à s'adapter, et pour d'autres qui ne peuvent pas le faire, lentement vers leur extinction.

- Les feux de forêt, comme mentionné précédemment, peuvent avoir des effets bénéfiques pour les écosystèmes forestiers en contribuant à son rajeunissement. Cependant, des incendies répétés et plus intenses, comme il en survient dans certaines régions du globe en raison des changements climatiques, peuvent rompre l'équilibre naturel du régime des feux et devenir plutôt catastrophiques pour la faune et la flore. D'abord, ils peuvent, bien sûr, causer la mort des organismes. À plus long terme surtout, la perte d'habitat qu'ils occasionnent et le stress pour les espèces ayant survécu, qui ne sont pas nécessairement adaptées à une telle perturbation, peuvent avoir des effets négatifs majeurs sur leur survie. Par exemple, les feux de forêt dévastateurs qui ont ravagé l'Australie à la fin de 2019 et au début de 2020 ont affecté pas moins de trois milliards d'animaux¹¹² selon l'estimation du World Wildlife Fund¹¹³.
- La hausse de la température et de l'acidité des océans entraîne une modification considérable de certains habitats marins. Le blanchissement des coraux est une des conséquences qui en découlent. Il s'agit d'un bon exemple de la manière dont les changements dans un habitat peuvent affecter les organismes qui y vivent. Les coraux affectés par le blanchissement sont des organismes symbiotiques, c'est-à-dire qu'ils vivent en symbiose¹¹⁴ avec un autre organisme, dans ce cas-ci une algue. Chaque organisme profite de cette association : l'algue fournit au corail de l'oxygène et des sucres par la photosynthèse, le corail fournit des nutriments à l'algue par ses déchets métaboliques ainsi qu'un environnement sécuritaire. Les coraux sont naturellement d'une couleur blanchâtre transparente. Ce sont les algues qui confèrent aux récifs coralliens leurs magnifiques couleurs. Les coraux et les algues avec lesquelles ils vivent en symbiose sont adaptés à des conditions environnementales spécifiques. Avec la hausse de la température et de l'acidité des océans, notamment, les conditions de leurs habitats sont modifiées et ne sont plus optimales, ce qui amène les algues à quitter les coraux. Ces derniers perdent ainsi leur couleur, expliquant la provenance du terme « blanchissement des coraux ». À moins que des algues ne reviennent les coloniser si les conditions environnementales se rétablissent, le départ des algues mène au dépérissement et à la mort des coraux.

¹¹² Ces animaux ont été tués ou forcés à se déplacer vers un autre habitat.

¹¹³ World Wildlife Fund, New WWF report: 3 billion animals impacted by Australia's bushfire crisis, 2020.

¹¹⁴ Association durable entre deux êtres vivants.

Organismes vivants

Les organismes vivants réagissent de différentes façons aux changements du climat et aux répercussions en découlant sur leur habitat. Leur réaction et leur capacité à s'adapter dépendent bien sûr de la gravité de ces changements et de la vitesse à laquelle ils se réalisent, mais aussi des caractéristiques des organismes eux-mêmes. Les conséquences observées chez les différentes espèces terrestres et aquatiques varient donc grandement. Les êtres vivants et leur comportement sont complexes à comprendre et à prédire. Il demeure donc difficile de prévoir avec précision comment les organismes vivants évolueront au cours des prochaines décennies en réponse aux changements climatiques. Certaines grandes tendances peuvent être tout de même établies en fonction des observations actuelles.

En réaction aux changements climatiques, on remarque chez plusieurs organismes vivants des modifications concernant, par exemple, leur aire de répartition, c'est-à-dire la région où ils vivent et prospèrent. Un déplacement latitudinal ou longitudinal de l'aire de répartition est donc observé pour certaines espèces, tout comme un changement d'altitude pour les espèces plutôt alpines.

TENDANCE À L'ÉCHELLE PLANÉTAIRE DANS L'AIRE DE RÉPARTITION DES ORGANISMES VIVANTS

En réaction aux changements climatiques, on observe chez de nombreux organismes vivants des modifications concernant leur aire de répartition. À l'échelle planétaire, un déplacement global vers les pôles et vers de plus hautes altitudes est observé dans la répartition géographique de plusieurs espèces terrestres et aquatiques. En se déplaçant vers les pôles ou vers de plus hautes altitudes en réponse aux changements climatiques, les organismes retrouvent les conditions environnementales, notamment la température, auxquelles ils sont initialement adaptés. Une étude de 2011¹¹⁵ estime d'ailleurs un déplacement médian de l'aire de répartition des espèces terrestres de 16,9 kilomètres par décennie vers les pôles et de 11 mètres par décennie vers de plus hautes altitudes. Ce phénomène se fait bien sûr au détriment des espèces polaires qui se trouvent, quant à elles, déjà aux régions les plus aux pôles. Leur répartition ne peut donc pas être déplacée davantage vers les pôles. Il en est de même pour les espèces alpines se trouvant déjà aux altitudes terrestres les plus élevées. Ces espèces « mises au pied du mur » n'ont ainsi d'autre choix que de s'adapter pour survivre, d'abord, aux changements de conditions environnementales de leur habitat et, en plus, à une compétition plus féroce pour les ressources avec la venue d'organismes provenant de latitudes ou d'altitudes plus basses.

Le moment où certaines activités périodiques ont lieu chez des espèces peut être aussi affecté en réponse aux changements climatiques. C'est le cas notamment du moment où certains organismes, comme des végétaux, passent d'une phase de dormance à une phase active au

¹¹⁵ Chen *et al.*, "Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming", *Science*. 2011.

printemps, ou encore du moment où des espèces migratoires, comme certains oiseaux, entreprennent leurs migrations saisonnières.

Des effets sur les interactions de prédation et de compétition entre certaines espèces sont aussi observés. Par exemple, si un prédateur est négativement affecté par les changements de conditions de son environnement, cela peut entraîner une baisse de la pression de prédation qu'il applique sur ses proies et, ainsi, des répercussions positives sur ces dernières. Ce phénomène complexifie particulièrement l'étude des effets des changements climatiques sur les organismes vivants puisqu'une bonne connaissance de leurs interactions entre eux est nécessaire.

Enfin, l'ensemble des réactions des organismes vivants en réponse à des changements concernant leur environnement a généralement un effet sur leur abondance ou sur la taille de leurs populations. En effet, la survie et la mortalité des organismes peuvent être directement ou indirectement affectées par des changements de leurs habitats et cela entraîne en retour une hausse ou une baisse de leur abondance. Dans certains cas, l'abondance des espèces diminue au point critique où leur pérennité est en danger. Cela menace du même coup la biodiversité¹¹⁶, capital naturel sur lequel repose en grande partie le bien-être économique et social des humains¹¹⁷. Un rapport de l'IPBES, un groupe international d'experts sur la biodiversité rattaché à l'Organisation des Nations unies, de 2019¹¹⁸ estime d'ailleurs que près d'un million d'espèces sont actuellement menacées d'extinction en raison des changements climatiques et d'autres causes liées à l'activité humaine.

¹¹⁶ La variété des espèces et des écosystèmes, ainsi que les processus écologiques dont ils font partie.

¹¹⁷ « Elle [la biodiversité] contribue à l'assainissement de l'air et de l'eau, à la régulation du climat, au stockage du carbone, à la pollinisation et à la régulation des crues. Les humains profitent de façon directe et indirecte de la biodiversité, par exemple, comme source de nourriture, de fibres, de matériaux pour la fabrication de vêtements et de produits forestiers, et pour soutenir les activités récréatives. » Tiré de Nantel, P., M. G. Pellatt, K. Keenleyside et P. A. Gray. « Biodiversité et aires protégées », dans Warren, F. J. et D. S. Lemmen (réd.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, Ottawa, Gouvernement du Canada, 2014.

¹¹⁸ IPBES, *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 2019.

L'OURS POLAIRE : UNE ESPÈCE PORTE-DRAPEAU VULNÉRABLE

Une espèce porte-drapeau est une espèce emblématique bénéficiant d'une représentation positive de la part du grand public et facilitant généralement la mobilisation en faveur de la protection de son habitat¹¹⁹. L'ours polaire en est certainement une. Il s'agit d'une des espèces les plus souvent associées aux changements climatiques, au réchauffement planétaire et à la fonte de la banquise arctique. Quelques facteurs contribuent à menacer sa survie. Le plus important est sans doute la fonte de la banquise. En effet, l'ours polaire utilise la glace de mer, entre autres, pour se déplacer et pour chasser. La réduction de la banquise, particulièrement en été, complexifie la survie des ours. De plus, sa proie principale, le phoque, utilise la glace de mer pour mettre bas. La fonte de la banquise affecte ainsi négativement le phoque et sa survie, ce qui influence indirectement bien sûr celle de l'ours polaire qui s'en nourrit. La difficulté rencontrée par les ours polaires à se nourrir en mer avec la fonte des glaces se traduit notamment par l'observation d'une plus forte présence de ceux-ci sur la terre ferme et par une plus grande proportion de proies terrestres dans leur alimentation.

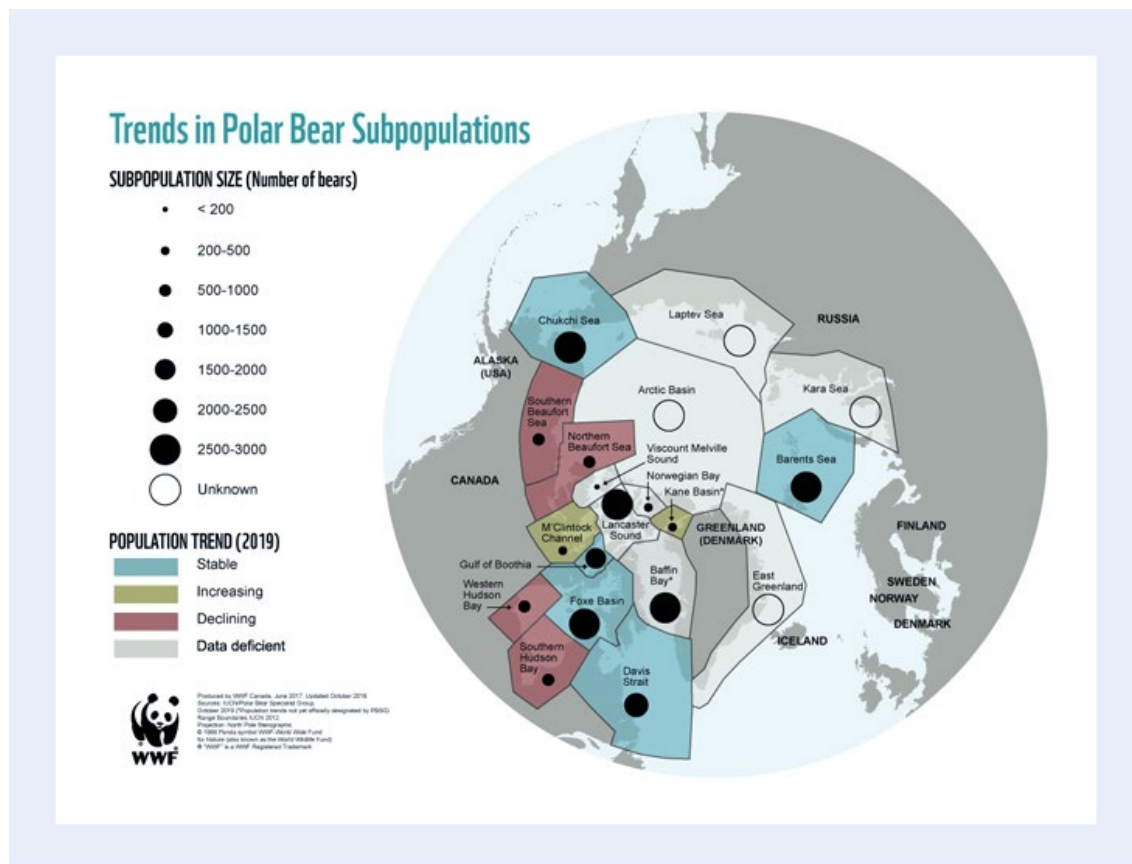


Figure 22. Tendances dans l'évolution des sous-populations d'ours polaires. Source : [World Wildlife Fund, 2019](#).

¹¹⁹ World Wildlife Fund, [Know your flagship, keystone, priority and indicator species](#).

À l'opposé, d'autres espèces profitent des changements climatiques et voient plutôt leur abondance augmenter. Cela constitue bien sûr un point positif pour ces espèces qui profitent des circonstances. Toutefois, des effets subséquents négatifs pour les écosystèmes et pour d'autres espèces selon le contexte peuvent en résulter. Par exemple, certaines espèces dites envahissantes¹²⁰, qui s'adaptent plus facilement à de nouvelles conditions environnementales, profitent des changements climatiques pour, parfois, étendre leur aire de répartition, mais surtout « prendre le contrôle » de certains écosystèmes. Selon la dernière synthèse¹²¹ du consortium Ouranos, les conditions climatiques futures au Québec, entre autres des températures plus élevées, seront favorables à la prolifération de ce type d'espèces. Plusieurs répercussions pourraient s'ensuivre, surtout si les espèces envahissantes ne sont pas originaires du Québec. Ces dernières sont susceptibles de nuire aux espèces indigènes et ainsi de modifier la structure des écosystèmes québécois. Certaines activités humaines pourraient en pâtir, comme l'exploitation forestière et l'agriculture, notamment avec la multiplication d'insectes ravageurs.

LES MÉDUSES : QUAND ACTIVITÉS HUMAINES SIGNIFIENT PROSPÉRITÉ

Pendant que des espèces font face à d'innombrables obstacles générés par l'être humain menaçant leur survie, qu'ils soient ou non liés aux changements climatiques, plusieurs espèces de méduses, quant à elles, prospèrent dans les océans. Et les activités humaines en seraient en grande partie responsables. La surpêche de plusieurs espèces de poissons qui compétitionnent avec les méduses pour les ressources serait une des causes principales de la prolifération importante de ces organismes gélatineux, tout comme les changements climatiques. En effet, plusieurs études suggèrent que le réchauffement et l'acidification des océans seraient favorables au développement des méduses. De plus, elles n'ont pas beaucoup de prédateurs. Toutes ces conditions réunies profitent ainsi aux méduses. Elles pourraient donc sortir gagnantes des changements climatiques et, dans un avenir peu lointain, possiblement dominer les écosystèmes marins au détriment d'autres espèces.

¹²⁰ Espèce qui prospère au détriment d'autres espèces, en les supplantant, et engendrant ainsi généralement des nuisances environnementales, économiques ou de santé humaine.

¹²¹ Ouranos, 2015. *op. cit.*



Figure 23. Regroupement de méduses. Source : [Wikimedia Commons](#), 2020.

CONCLUSION

Dans ce premier chapitre de la série sur le thème des changements climatiques, l'accent a été mis principalement sur les fondements scientifiques derrière ce phénomène. Comme il a été ainsi possible de le constater, une transformation du climat est déjà amorcée à l'échelle planétaire. D'après les projections, nous n'observons maintenant que la pointe de l'iceberg. Ces bouleversements ont et auront des conséquences colossales sur notre environnement, dont certaines pourraient s'avérer irréversibles. L'intensité des changements du climat et de leurs répercussions pourrait être néanmoins tempérée selon les efforts de lutte qui y seront consentis. La prise en compte des risques climatiques et l'action concertée pour atténuer les changements climatiques constituent des avenues incontournables pour en éviter les pires conséquences.

RÉFÉRENCES

Arrhenius, S., « On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. » The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(251), 1896, 237-276.

Barette, Nathalie, Notes fournies dans le cours GGR-1006 Changements climatiques, Université Laval, Québec, 2014.

Bush, E. and Lemmen, D.S., editors (2019): *Canada's Changing Climate Report*, Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p.

Chen *et al.*, "Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming", *Science*. 2011.

Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies, Genève, 1992, 25 p.

Edwards, P., A brief history of atmospheric general circulation modeling. General Circulation Model Development (Past, Present, and Future), D. Randall, Ed., Academic Press, 2000, pp. 67–90.

Fortier, Louis, Notes fournies dans le cours BIO-1250 Océanographie physique, Université Laval, Québec, 2014.

Guarino, MV., Sime, L.C., Schröder, D. *et al.* "Sea-ice-free Arctic during the Last Interglacial supports fast future loss". *Nature Climate Change*, 10, 928–932, 2020.

IPBES, *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany, 2019.

IPCC (GIEC), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, 1535 p.

IPCC (GIEC), 2014: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC (GIEC), 2018: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O.

Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). In Press.

IPCC (GIEC), 2019: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

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

Kim, B. M., Son, S. W., Min, S. K., Jeong, J. H., Kim, S. J., Zhang, X., Shim, T. & Yoon, J. H. "Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss". *Nature Communications*, 5(1), 2014, 1-8.

Kwok & Rothrock, "Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008", *Geophysical Research Letters*, 2009.

Lajoie, G., 2017. *Impacts des feux de forêt sur le secteur forestier québécois dans un climat variable et en évolution*. Montreal, QC, CA, Ouranos.

Levasseur, Maurice, Notes fournies dans le cours BIO-7013 Cycles biogéochimiques et échanges océan-atmosphère, Université Laval, Québec, 2016.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatique, Gaz à effet de serre (GES). [Consulté le 26 octobre 2021]

Mudryk, L. *et al.*, "Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi28 model ensemble", *The Cryosphere*, 14, 2020.

Nantel, P., M. G. Pellatt, K. Keenleyside et P. A. Gray. « Biodiversité et aires protégées », dans, Warren, F. J. et D. S. Lemmen (réd.), *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, Ottawa, Gouvernement du Canada, 2014.

National Aeronautics and Space Administration, Facts - Global temperature. [Consulté le 26 octobre 2021]

National Aeronautics and Space Administration, How Scientists Around the World Track the Solar Cycle, 2020. [Consulté le 25 octobre 2021]

National Aeronautics and Space Administration, What Is the Sun's Role in Climate Change?, 2019. [Consulté le 25 octobre 2021]

National Geographic, The Keeling Curve, 2019. [Consulté le 26 octobre 2021]

National Institute of Water and Atmospheric Research, How do we determine past climate? [Consulté le 25 octobre 2021]

National Oceanic and Atmospheric Administration, Climate Models. [Consulté le 29 octobre 2021]

National Oceanic and Atmospheric Administration – Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. [Consulté le 26 octobre 2021]

National Oceanic and Atmospheric Administration, Past Climate. [Consulté le 25 octobre 2021]

National Oceanic and Atmospheric Administration, Understanding climate: Antarctic sea ice extent. [Consulté le 29 octobre 2021]

National Snow and Ice Data Center, 2020. *Arctic Sea Ice News and Analysis - Monthly archives: April 2020*.

National Snow and Ice Data Center. All About Arctic Climatology and Meteorology – Climate vs. Weather, 2020. [Consulté le 25 octobre 2021]

Ouranos, *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec, Edition 2015*, Montréal, Québec : Ouranos, 2015, 415 p.

United States Environmental Protection Agency, Greenhouse Gas Emissions - Global Greenhouse Gas Emissions Data. [Consulté le 26 octobre 2021]

University Corporation for Atmospheric Research, Learning Zone - How Volcanoes Influence Climate. [Consulté le 25 octobre 2021]

World Meteorological Organization, WMO Greenhouse Gas Bulletin - No. 15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018, 2019. [Consulté le 26 octobre 2021]

World Meteorological Organization, WMO Integrated Global Observing System. [Consulté le 25 octobre 2021]

Zhang *et al.*, "Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere", Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost, 2003.