



CHAPITRE 2

# Comprendre les changements climatiques mondiaux observés

RAPPORT SUR LE CLIMAT CHANGEANT DU CANADA



Gouvernement  
du Canada

Government  
of Canada

Canada



## Auteurs

Elizabeth Bush, Environnement et Changement climatique Canada

Nathan Gillett, Environnement et Changement climatique Canada

Emma Watson, Environnement et Changement climatique Canada

John Fyfe, Environnement et Changement climatique Canada

Felix Vogel, Environnement et Changement climatique Canada

Neil Swart, Environnement et Changement climatique Canada

Citation recommandée : Bush, E., N. Gillett, E. Watson, J. Fyfe, F. Vogel et N. Swart. « Comprendre les changements climatiques mondiaux observés », chapitre 2 dans Rapport sur le climat changeant du Canada, E. Bush et D.S. Lemmen (éd.), gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019, p. 24-73.



## Table des matières du chapitre

### MESSAGES CLÉS DU CHAPITRE

### RÉSUMÉ

#### 2.1 : Introduction

#### 2.2 : Changements observés dans le système climatique mondial

2.2.1 : Changements dans les températures mondiaux annuels et les températures extrêmes

2.2.2 : Changements dans les précipitations mondiaux annuels et extrêmes et changements hydrologiques connexes

2.2.3 : Changements océaniques

2.2.4 : Changements dans la cryosphère

#### 2.3 : Comprendre les causes des changements climatiques mondiaux observés

2.3.1 : Facteurs qui déterminent le climat mondial

Encadré 2.1 : L'effet de serre et les facteurs des changements climatiques

Encadré 2.2 : Sources des principaux gaz à effet de serre

Encadré 2.3 : Rétroactions positives qui amplifient les changements climatiques

2.3.2 : Variations dans les concentrations de gaz à effet de serre et modifications du forçage radiatif au cours de l'ère industrielle

2.3.2.1 : Variations dans les concentrations de gaz à effet de serre au cours de l'ère industrielle

FAQ 2.1 : Les humains sont-ils responsables de l'élévation observée du dioxyde de carbone atmosphérique?

Encadré 2.4 : Surveillance au Canada des gaz à effet de serre atmosphériques

2.3.2.2 : Modifications du forçage radiatif au cours de l'ère industrielle

2.3.3 : Variabilité climatique naturelle

Encadré 2.5 : Modes de variabilité climatique

2.3.4 : Détection et attribution des changements observés

### RÉFÉRENCES



Ce chapitre offre un résumé des données probantes que le système climatique de la Terre se réchauffe, que les autres aspects du climat changent de manière consistante avec ce réchauffement et que les activités humaines sont la cause principale de ces changements.

## Messages clés du chapitre

### 2.2: Changements observés dans le système climatique mondial

Le réchauffement du système climatique pendant l'ère industrielle est sans équivoque, fondé sur des données probantes et robustes qui proviennent d'un ensemble d'indicateurs. La température moyenne mondiale a augmenté, tout comme la vapeur d'eau atmosphérique et le contenu thermique de l'océan. La glace terrestre a fondu et s'est amincie, ce qui contribue à l'élévation du niveau de la mer, et la glace marine dans l'Arctique a été grandement réduite.

### 2.3: Comprendre les causes des changements mondiaux observés

Le réchauffement n'a pas été stable au fil du temps, alors que la variabilité climatique naturelle a ajouté au réchauffement causé par l'humain ou l'a réduit. Les périodes de réchauffement accrues ou réduites sont prévues sur des échelles de temps décennales et les facteurs qui causent le ralentissement du réchauffement au début du XXI<sup>e</sup> siècle sont maintenant mieux compris. Au cours des dernières années, la température moyenne mondiale s'est considérablement réchauffée, suggérant que le ralentissement du réchauffement est maintenant terminé.

L'effet de rétention de la chaleur des gaz à effet de serre atmosphériques est bien établi. Il est *extrêmement probable*<sup>2</sup> que les activités humaines, en particulier les émissions de gaz à effet de serre, sont la principale cause du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les facteurs naturels ne peuvent pas expliquer ce réchauffement observé. Qui plus est, des données probantes indiquant une influence humaine sur beaucoup d'autres changements au climat abondent également.

---

<sup>2</sup> Le présent rapport utilise le même langage calibré pour l'incertitude que le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Les cinq termes suivants sont utilisés pour exprimer le degré de confiance évalué dans les constatations selon la disponibilité, la qualité et la cohérence des preuves : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé. Les termes suivants sont utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : quasiment certain (probabilité de l'ordre de 99 % à 100 %), extrêmement probable (probabilité de l'ordre de 95 % à 100 %), très probable (probabilité de l'ordre de 90 % à 100 %), probable (probabilité de l'ordre de 66 % à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (probabilité de l'ordre de 33 % à 66 %), improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 33 %), très improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 10 %), extrêmement improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 5 %), exceptionnellement improbable (probabilité de l'ordre de 0 % à 1 %). Ces termes sont insérés en caractères italiques dans le texte. Voir le chapitre 1 pour plus de précisions.

## Résumé

Le système climatique de la Terre comprend des composants physiques qui interagissent – l’atmosphère, l’hydrosphère (l’eau sous forme liquide sur la Terre), la cryosphère (les éléments gelés), la surface terrestre, et la biosphère qui comprend tous les organismes vivants sur terre et dans l’eau. Les mesures des variables au sein de tous ces systèmes offrent des sources de données indépendantes qui confirment que le système climatique mondial se réchauffe. La consistance des signaux dans l’ensemble des nombreuses composantes du système climatique offre une situation convaincante du changement sans équivoque.

L’indicateur le plus connu pour suivre les changements climatiques est la température moyenne à la surface du globe (TMSG), estimée comme la température moyenne du monde à partir de mesures des températures à la surface des océans et des températures de l’air près de la surface au-dessus de la terre. Cette mesure a augmenté d’environ 0,85 °C (plage d’incertitude de 90 % allant de 0,65 °C à 1,06 °C) sur la période de 1880 à 2012. Chacune des trois dernières décennies (1980, 1990 et 2000) a battu des records successifs pour des températures moyennes sur dix ans. Un ralentissement du réchauffement s’est produit au début du XXI<sup>e</sup> siècle, même si la température décennale pour les années 2000 était plus élevée que durant les années 1990. La variabilité climatique naturelle influence la TMSG sur diverses échelles de temps; par conséquent, des périodes de réchauffement réduit ou accru sur des échelles décennales sont prévues. Les causes du ralentissement du réchauffement au début du XXI<sup>e</sup> siècle sont maintenant mieux comprises, et le ralentissement semble avoir terminé, avec les années 2015, 2016 et 2017 qui sont les années les plus chaudes enregistrées, avec une TMSG de plus de 1 °C au-dessus du niveau moyen préindustriel.

Les signaux du changement climatique sont aussi évidents dans d’autres composantes du système climatique. Le virage vers un climat mondial plus chaud en moyenne a été accompagné par une augmentation des chaleurs extrêmes et une réduction des froids extrêmes. La quantité de vapeur d’eau (humidité atmosphérique) dans l’atmosphère a *très probablement* augmenté, conformément avec la capacité de l’air chaud à retenir plus d’humidité. Non seulement l’océan s’est réchauffé à sa surface, mais il est quasiment certain que l’ensemble des couches supérieures de l’océan (jusqu’à une profondeur de 700 m) s’est réchauffé. Le niveau moyen de la mer à l’échelle mondiale s’est accru d’environ 0,19 m sur la période de 1901 à 2010 (plage d’incertitude de 90 % allant de 0,17 m à 0,21 m) comme conséquence de la dilatation de l’eau des océans en raison du réchauffement (l’eau plus chaude prend plus de volume) et de la montée de l’eau en provenance de la fonte des glaciers et des nappes glacières dans le monde. L’étendue de glace marine dans l’Arctique n’a cessé de diminuer pendant toutes les saisons, avec des diminutions plus évidentes en été et en automne.

Comprendre dans quelle mesure l’activité humaine a contribué au réchauffement observé du système climatique s’inspire également de multiples sources de données. Cela comprend des données probantes qui proviennent d’observation, d’une compréhension améliorée des processus et des rétroactions au sein du système qui détermine de quelle façon le système climatique répond aux perturbations naturelles et causées par l’humain et des modèles climatiques (voir le chapitre 3.3.1).



La capacité des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère de la Terre à absorber l'énergie thermique émise par la Terre est bien comprise. Les émissions de GES qui proviennent des activités humaines ont mené à une accumulation des niveaux de GES atmosphériques. L'élévation des niveaux de GES atmosphériques, principalement le dioxyde de carbone, a été le principal facteur du réchauffement climatique pendant l'ère industrielle. Le fort effet de réchauffement des augmentations dans les GES a été atténué dans une certaine mesure par les augmentations dans les niveaux d'aérosols atmosphériques qui ont des effets de refroidissement climatique. Les variations dans l'intensité du soleil pendant l'ère industrielle ont eu un effet de réchauffement sur le climat qui est au moins 10 fois plus petit que l'activité humaine et ne peut expliquer l'augmentation observée dans la température mondiale. Les éruptions volcaniques ont des effets de refroidissement sur le climat mondial qui peuvent durer plusieurs années, mais qui ne peuvent pas expliquer les changements à long terme de la température mondiale.

La détermination de la proportion du réchauffement climatique observée et d'autres changements climatiques qui sont attribuables à ces facteurs est une tâche complexe, puisque le système climatique ne répond pas à ces facteurs de manière directe. Pour accomplir cette tâche, les modèles climatiques (ou du système terrestre) sont des outils essentiels pour identifier les causes des changements climatiques observés. Des expériences avec ces modèles simulent la façon dont le système climatique répond aux changements du monde réel, y compris les répercussions des activités humaines, et le compare aux expériences idéalisées sans interférence humaine. En fonction d'une analyse des observations et de telles expériences, il est **extrêmement probable** que les interférences humaines, principalement les émissions de GES, sont la cause première du réchauffement climatique mondial observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les études ont confirmé qu'il y a une contribution humaine aux changements observés dans la couche inférieure de l'atmosphère, la cryosphère et l'océan, à l'échelle mondiale.

## 2.1: Introduction

L'oscillation entre les périodes glaciaires froides et les périodes interglaciaires chaudes au cours des derniers deux millions d'années sur Terre témoigne de l'effet sur le climat des changements de la Terre dans la température moyenne mondiale de l'ordre de 5 °C (Jansen et coll., 2007; Masson-Delmotte et coll., 2013). De nos jours, sur des échelles centenaires, le monde s'est réchauffé d'environ 1 °C depuis le commencement de l'ère industrielle (voir la section 2.2.1), et un réchauffement additionnel est inévitable au cours de ce siècle. L'Accord de Paris, en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques<sup>3</sup>, a pour objectif de tenir l'augmentation dans la température moyenne mondiale bien en dessous de 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels et poursuivre les efforts afin de limiter l'augmentation de la température à 1,5 °C. Étant donné que le réchauffement climatique nous a déjà rapprochés près de ce but, il est important de comprendre la façon dont le climat change et pourquoi. Ce chapitre offre un résumé de cette compréhension en se basant principalement sur les preuves présentées dans de multiples chapitres du Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe 1 d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2013a).

Ceci est l'un des deux chapitres de ce rapport qui examine les changements climatiques à l'échelle mondiale. Ensemble, les chapitres 2 et 3 offrent un contexte des renseignements généraux pour l'évaluation des changements climatiques passés et futurs au Canada qui se retrouve aux chapitres 4 à 7. Ce contexte permet au rapport d'offrir une description complète au public canadien sur la façon dont les changements au Canada sont la manifestation de changements climatiques à l'échelle mondiale. Les renseignements généraux sur les changements climatiques et la variabilité climatique dans ce chapitre sont mentionnés dans les chapitres subséquents de ce rapport. Bien qu'il provienne principalement du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, ce chapitre comprend aussi quelques études récentes pour mettre à jour les tendances pour les indicateurs clés des changements climatiques mondiaux et afin de souligner les domaines où la compréhension scientifique a avancé de manière importante depuis 2013. Ce chapitre se concentre sur les changements climatiques contemporains, couvre les périodes récentes dans le passé (d'échelles multidécennales à centenaires) pour lesquelles des relevés instrumentaux sont disponibles. Pour une évaluation récente des changements dans les climats passés sur des échelles de temps plus longues (d'échelles multicentennaires à multimillénaires) et leurs causes, les lecteurs sont référés au chapitre cinq (5) du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Masson-Delmotte et coll., 2013).

---

3 <https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris>

## 2.2: Changements observés dans le système climatique mondial

### Message clé

Le réchauffement du système climatique pendant l'ère industrielle est, sans équivoque, fondé sur des données probantes et robustes qui proviennent d'un ensemble d'indicateurs. La température moyenne mondiale a augmenté, tout comme la vapeur d'eau atmosphérique et le contenu thermique de l'océan. La glace terrestre a fondu et s'est amincie, ce qui contribue à l'élévation du niveau de la mer, et la glace marine dans l'Arctique a été grandement réduite.

Le système climatique mondial comprend de nombreuses composantes qui interagissent, ce qui englobe l'atmosphère, l'hydrosphère (l'eau liquide dans les océans, les lacs et les rivières, etc.), la cryosphère (neige, glace et sol gelé), la biosphère (tous les organismes vivants sur terre et dans l'eau) et la surface terrestre. Les changements à long terme qui sont compatibles avec un réchauffement général du système climatique peuvent être observés dans les diverses composantes du système. Dans cette section, les changements observés dans la température moyenne à la surface du globe (TMSG), les précipitations, la cryosphère et les océans sont examinés. Ces changements sont résumés aux chapitres 2, 3 et 4 du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Hartmann et coll., 2013; Rhein et coll., 2013; Vaughan et coll., 2013). Des observations plus récentes indiquent une continuation générale du réchauffement et des changements liés, avec une variabilité évidente d'année en année à court terme, tout comme dans le premier enregistrement climatique (Blunden et Arndt, 2017; USGCRP, 2017).

Le « climat » peut être considéré comme la moyenne, ou la prévision, de la météo et des conditions atmosphériques, terrestres et marines liées pour une région particulière. Les statistiques climatiques sont généralement calculées pour des périodes de 30 ans, comme recommandé par l'Organisation météorologique mondiale. Les « changements climatiques » font référence aux changements à long terme du climat, mesurés par les changements dans la moyenne de l'état et de sa variabilité (GIAC, 2013c). La mesure des changements climatiques nécessite par conséquent des observations à long terme des paramètres climatiques afin que les tendances à long terme puissent être distinguées des variations à plus court terme (voir la section 2.3.3).

On s'attend à ce que des changements dans la fréquence, l'intensité et la durée des extrêmes climatiques et météorologiques<sup>4</sup> accompagnent un climat en changement. Ces changements peuvent avoir de grandes répercussions sur les systèmes humains et naturels. Pour quelques types d'extrêmes (p. ex. les journées et les nuits chaudes et froides), les changements dans la fréquence sont une conséquence naturelle d'un virage vers un climat plus chaud en moyenne. Pour les autres extrêmes, les facteurs sous-jacents de changements prévus sont plus compliqués et peuvent comprendre des changements dans le cycle de l'eau, les températures des océans, la circulation atmosphère-océan et d'autres facteurs.

Quantifier les changements dans de nombreux extrêmes climatiques et météorologiques est plus difficile que de quantifier les changements dans la moyenne des conditions climatiques, pour plusieurs raisons (GIEC, 2012). Par définition, les extrêmes se produisent rarement. Par conséquent, les données observationnelles qui s'étendent sur de nombreuses décennies ou plus sont nécessaires afin de calculer les statistiques adéquates à propos du taux d'incidence historique des extrêmes, mais elles sont souvent incomplètes.

4 Les extrêmes météorologiques se produisent sur des échelles de temps plus courtes (p. ex. un événement de précipitation abondante d'une courte durée) que les extrêmes de climat (p. ex. la sécheresse). Pour de plus amples détails sur la différenciation entre les extrêmes météorologiques et climatiques, se référer à GIEC (2012).

## 2.2.1: Changements dans les températures mondiaux annuels et les températures extrêmes

Des enregistrements à l'échelle mondiale des températures à la surface, basés sur des observations de thermomètres des températures à la surface de l'air au-dessus du sol et des mesures des températures de la surface de la mer sont disponibles depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. D'après ces observations, divers groupes de recherche ont conçu des ensembles de données sur la température mondiale (voir la figure 2.1) par l'utilisation de différentes procédures pour le traitement des données brutes disponibles, comme le traitement des lacunes dans les observations (voir la section 2.3.3). Basée sur ces ensembles de données sur la température mondiale produite indépendamment, une meilleure estimation de la TMSG a été calculée, ce qui représente les changements terrestres et océaniques. Cette estimation montre que la TMSG a augmenté de 0,85 °C au cours de la période de 1880 à 2012 (selon une tendance linéaire, avec une incertitude allant de 0,65 °C à 1,06 °C) (Hartmann et coll., 2013). Les trois dernières décennies (de 1980 à 2010), ont été les plus chaudes enregistrées, avec le plus grand ensemble de données qui s'étend jusqu'à 1850 (voir la figure 2.1) (Hartmann et coll., 2013). Les températures mondiales au cours des trois dernières années avec des enregistrements complets (2015, 2016 et 2017) sont les trois années les plus chaudes enregistrées au niveau mondial en moyenne (OMM, 2018) à plus de 1 °C au-dessus des niveaux moyens de l'âge préindustriel (Blunden et Arndt, 2016, 2017; WMO, 2017, 2018; Hawkins et coll., 2017).

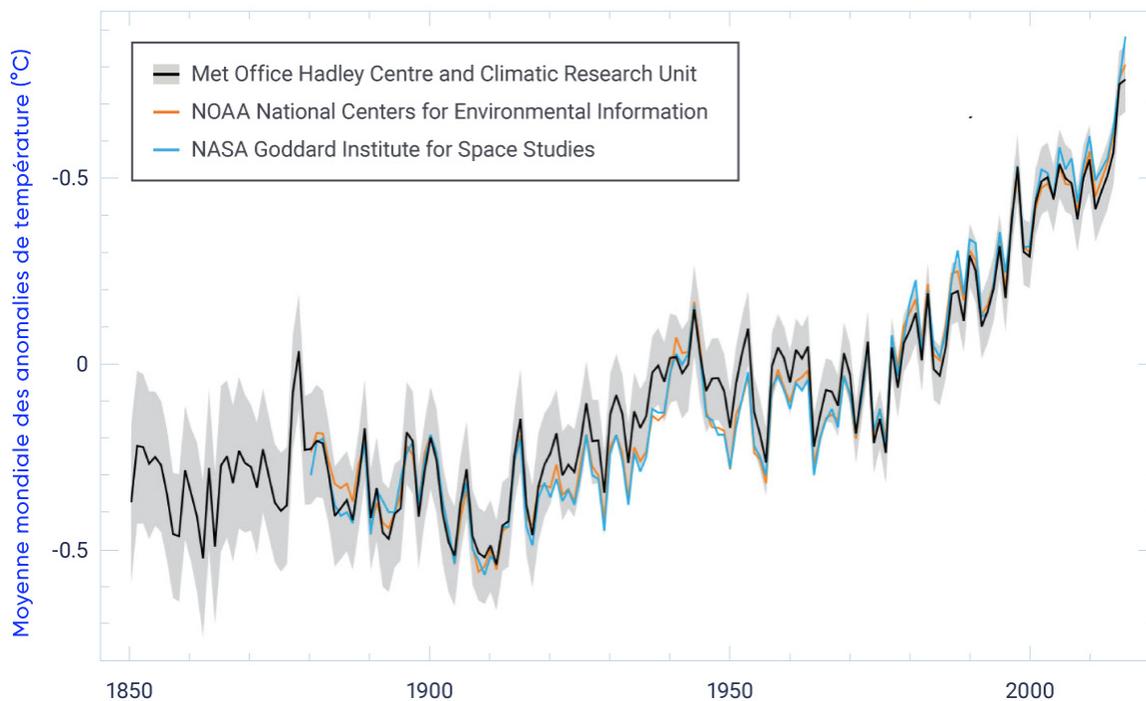


Figure 2.1: Moyenne mondiale annuelle observée des anomalies de température de surface, de 1850 à 2016

Écart (anomalie) de la température moyenne annuelle à la surface du globe par rapport à la moyenne au-dessus de la période de référence de 1961 à 1990, de trois ensembles de données. Les zones grises indiquent l'incertitude dans l'ensemble des données produit par le Met Office Hadley Centre and Climate Research Unit à la University of East Anglia, Royaume-Uni (HadCRU).

La TMSG annuelle n'a pas augmenté dans une progression linéaire constante depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (voir la figure 2.1). Pendant plusieurs périodes, le réchauffement a été plus prononcé (p. ex. de 1900 à 1940 et à partir de 1970) ou moins prononcé (p. ex. de 1940 à 1970). Ces fluctuations proviennent des variations naturelles au sein du système climatique (variabilité climatique interne) et des forces extérieures (externes), y compris les facteurs humains (voir la section 2.3.3).

Presque l'entièreté de la Terre a subi le réchauffement sur une échelle du siècle (de 1901 à 2012). Ce réchauffement n'était pas uniforme d'une région sur Terre à une autre, en raison d'un éventail de facteurs, y compris la variabilité climatique interne et les variations régionales dans les rétroactions climatiques et l'absorption de chaleur (Hartman et coll., 2013). En général, le réchauffement a été le plus fort aux latitudes nord et plus fort sur le sol que dans les océans. Puisque le Canada a une grande masse terrestre, la majorité située à des latitudes élevées au nord, le réchauffement dans l'ensemble du Canada est environ le double de la moyenne mondiale (voir le chapitre 4, section 4.2.1).

Les températures froides et chaudes extrêmes peuvent avoir de grandes répercussions sur les systèmes humains et naturels. Basé sur des ensembles de données observationnelles multidécennales et une analyse statistique rigoureuse, le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC rapporte que, pour la superficie mondiale des terres dans son ensemble, le nombre de jours et de nuits chaudes<sup>5</sup> a **très probablement** augmenté et le nombre de jours et de nuits froides a **très probablement** diminué au cours de la période de 1951 à 2010. Une évaluation statistique robuste des canicules et des vagues de chaleur est plus difficile. Le Cinquième Rapport d'évaluation estime, avec un **degré de confiance moyen**, que depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, la durée et la fréquence des vagues de chaleur, y compris les canicules<sup>6</sup>, ont augmenté pour les superficies mondiales des terres dans leurs ensembles (Hartmann et coll., 2013). À l'échelle continentale, il est **probable** que la fréquence des vagues de chaleur a augmenté dans quelques régions de l'Europe, de l'Asie et de l'Australie au cours de cette période. Pour l'Amérique du Nord et l'Amérique centrale, on peut dire avec un **degré de confiance moyen** que les régions ayant subi des augmentations de vagues de chaleur et de canicules sont plus nombreuses que celles ayant subi des diminutions (Hartmann et coll., 2013).

## 2.2.2: Changements dans les précipitations mondiaux annuels et extrêmes et changements hydrologiques connexes

La hausse des températures mondiales a des répercussions sur le cycle hydrologique (de l'eau). La quantité d'humidité que l'atmosphère peut contenir augmente avec la hausse des températures (environ 7 % par degré Celsius de réchauffement). Il est **très probable** que l'humidité spécifique mondiale – une mesure de la quantité de vapeur d'eau dans l'air – près de la surface et dans la troposphère<sup>7</sup> (voir la figure 2.2) a augmenté depuis les années 1970, ce qui est compatible avec la hausse de température observée au cours de cette période (Hartmann et coll., 2013).

---

5 Les jours et les nuits chaudes et les jours et les nuits froides sont définis à partir des températures quotidiennes lorsque les températures maximums pendant le jour et les températures pendant la nuit sont au-dessus du 90<sup>e</sup> percentile (chaude) ou en dessous du 10<sup>e</sup> percentile (froide).

6 Les canicules et les vagues de chaleur sont définies différemment dans la littérature, mais se réfèrent à des périodes de plusieurs jours avec des extrêmes de température élevés.

7 La troposphère est la plus basse couche de l'atmosphère de la Terre, elle s'étend de la surface à une altitude d'environ 10 km dans les latitudes moyennes (cette altitude varie selon la saison et l'emplacement).

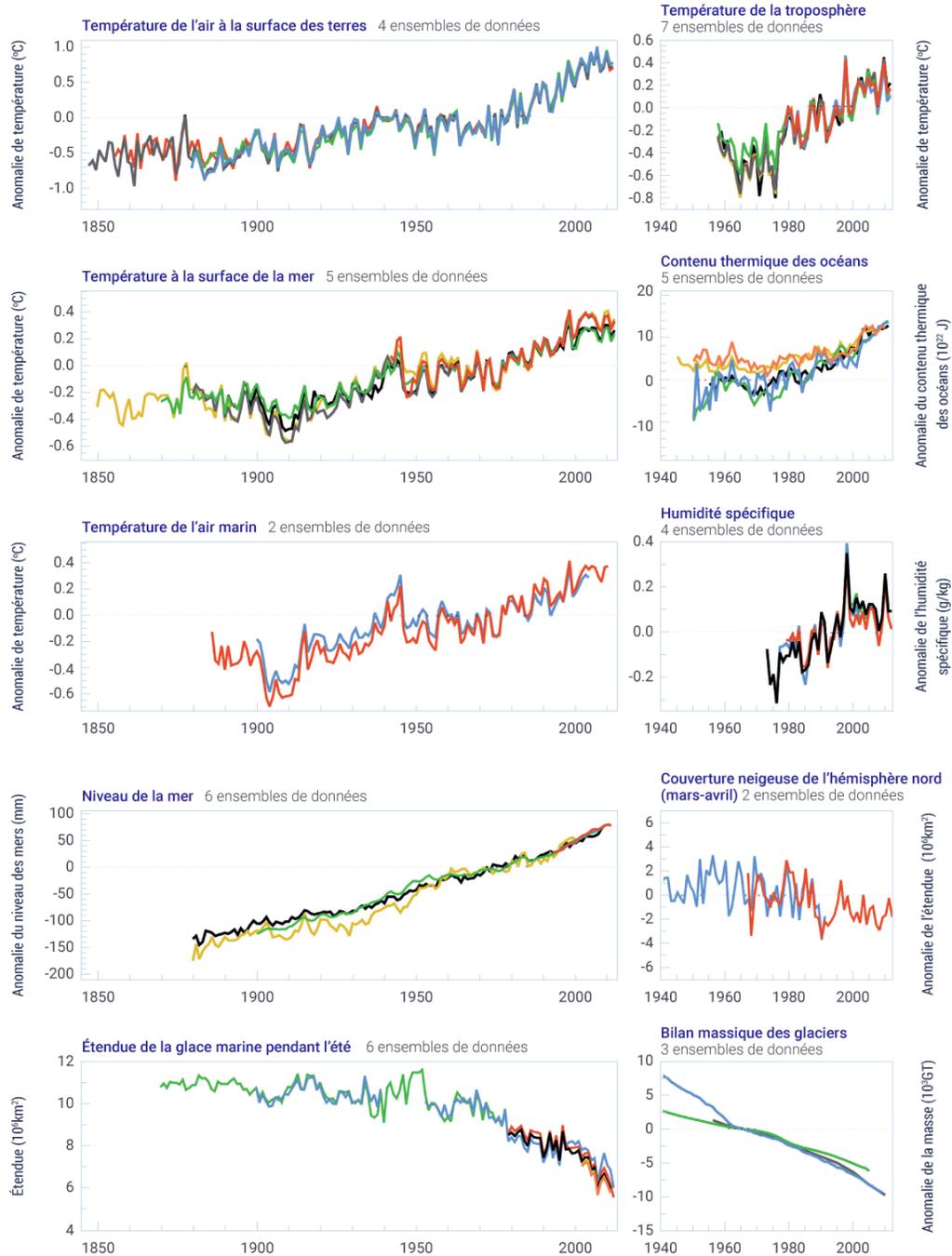


Figure 2.2: Divers indicateurs indépendants d'un climat mondial changeant

Divers indicateurs d'un climat mondial changeant provenant d'estimations calculées indépendamment. Les ensembles de données dans chaque panneau ont été normalisés à la même période d'enregistrement.

SOURCE DE LA FIGURE : HARTMAN ET COLL., 2013, FAQ 2.1, FIGURE 2. ENSEMBLES DE DONNÉES TROUVÉS DANS HARTMAN ET COLL., 2013, SUPPLEMENTARY MATERIAL SECTION 2.SM.5.

Les effets de la hausse des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre (GES) sur le cycle hydrologique et les précipitations sont plus complexes que pour la température. Les précipitations varient considérablement sur le temps et l'espace, de manière plus importante que la température. Les tendances des précipitations à long terme sont plus courtes, en comparaison avec l'éventail de la variabilité des précipitations, que les tendances relatives à l'éventail de la variabilité de la température. Par conséquent, une plus grande densité des stations de surveillance avec de grands enregistrements des précipitations est nécessaire pour une évaluation robuste des tendances des précipitations à comparer du cas de la température. En raison d'un manque de données, il y a un *degré de confiance faible* dans les estimations des changements de précipitations sur les terres à l'échelle mondiale avant 1951 et un *degré de confiance moyen* par la suite. La moyenne annuelle des précipitations pour les superficies mondiales des terres a légèrement augmenté au cours de la période de 1901 à 2008 et différents ensembles de données varient dans l'ampleur des changements observés (Hartmann et coll., 2013). Il reste difficile de déterminer les tendances à long terme dans les précipitations pour les océans mondiaux. À l'échelle régionale, la moyenne des précipitations annuelles pour la superficie des terres à la latitude moyenne dans l'hémisphère nord montre une hausse générale probable depuis 1901 avec un *degré de confiance moyen* avant 1951 et un *degré de confiance élevé* après cette date (Hartmann et coll., 2013). Les changements dans les précipitations dans l'ensemble du Canada sont abordés au chapitre 4.

Alors que le réchauffement climatique a amené plus d'humidité disponible dans l'atmosphère, cette humidité atmosphérique additionnelle peut mener à une intensité augmentée des épisodes de précipitations extrêmes qui varient par emplacements. Les changements observés dans les précipitations extrêmes sont généralement plus grands que ceux dans le total des précipitations annuelles. À l'échelle mondiale, les pluies extrêmes sur les terres, mesurées comme le nombre d'épisodes de précipitations abondantes, ont probablement augmenté dans plus de régions qu'elles n'ont diminué depuis les années 1950. Il y a une grande variabilité dans les régions et entre les saisons, mais le degré de confiance le plus élevé dans les résultats observés est pour le centre de l'Amérique du Nord, où il y avait une tendance *très probable* vers des épisodes de précipitations plus fortes depuis les années 1950 (Harman et coll., 2013).

Bien que des changements dans les tendances de précipitations soient susceptibles de contribuer aux changements dans les sécheresses et les inondations, il y a un *degré de confiance faible* dans les tendances mondiales pour ces deux catastrophes (Hartmann et coll., 2013). Par contre, les tendances à l'échelle régionale sont évidentes dans quelques régions, avec une hausse probable dans la fréquence et l'intensité des sécheresses dans la Méditerranée et l'Afrique de l'Ouest et une diminution probable dans le centre de l'Amérique du Nord (principalement au centre des États-Unis, mais comprend des parties du sud du Canada) depuis les années 1950. Les perspectives sur les changements dans la fréquence et la magnitude des sécheresses et des inondations dans un contexte canadien sont fournies dans le chapitre 6 (voir aussi le chapitre 4, section 4.4 pour une discussion de l'inondation de 2013 en Alberta).

### 2.2.3: Changements océaniques

Un grand nombre de changements observés au cours du siècle dernier offre des données probantes sur le réchauffement de l'océan mondial (Rhein et coll., 2013) (voir la figure 2.2). Des estimations complètes des températures mondiales moyennes dans les couches supérieures de l'océan (jusqu'à une profondeur de 700 m) révèlent que le réchauffement depuis le début des années 1970 est quasiment certain. Le réchauffement mondial moyen pour la couche supérieure de 75 m de l'océan au cours de la période de 1971 à 2012 était estimé à 0,11 °C (plage d'incertitude de 90 % allant de 0,09 °C à 0,13 °C) par décennie. Il y a une incertitude plus élevée dans les mesures des températures des océans avant 1971 en raison, en partie, du manque d'observations, mais le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC rapporte que le réchauffement mondial moyen (0-700 m) de 1870 à 1971 était probable. Le réchauffement a aussi été observé plus en profondeur dans les océans, même si les tendances ne sont pas aussi fortes. Le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC rapporte que la hausse du contenu thermique de l'océan (chaleur absorbée qui a été emmagasinée dans l'océan; voir la figure 2.2) compte pour environ 90 % de l'énergie accumulée mondialement au cours de la période de 1971 à 2010 (*degré de confiance élevé*). Cette accumulation d'énergie dans l'océan est une preuve solide de l'excès d'énergie dans le système terrestre, avec moins d'énergie qui quitte le système de la Terre que d'énergie qui entre (voir la section 2.3.1; Rhein et coll., 2013). En plus d'absorber la chaleur en excès, les océans de la Terre absorbent aussi le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en excès à partir de l'atmosphère ce qui augmente leur acidité (voir le chapitre 7, section 7.6.1).

Le niveau mondial des mers augmente principalement en conséquence de l'augmentation des niveaux d'eau de l'océan en raison du réchauffement (expansion thermique) et de l'eau des glaces terrestres (glaciers et nappes glacières) qui rejoint l'océan par la fonte ou l'écoulement de glace accru. Les enregistrements des marégraphes dans le monde et, plus récemment, les données altimétriques fournies par satellite indiquent que la moyenne mondiale du niveau des mers augmente depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (voir la figure 2.2). Le niveau a augmenté d'environ 0,19 m (plage d'incertitude de 90 % allant de 0,17 m à 0,21 m), selon une tendance linéaire au cours de la période de 1901 à 2012 et le taux de cette augmentation du niveau de la mer a probablement augmenté depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle (Rhein et coll., 2013).

L'élévation mondiale du niveau des mers et l'augmentation du contenu thermique des océans sont des fortes preuves d'un réchauffement mondial. Les influences de ces changements mondiaux sur les océans qui entourent le Canada sont détaillées au chapitre 7.

### 2.2.4: Changements dans la cryosphère

La cryosphère réfère aux parties de la Terre avec des températures suffisamment froides pour que l'eau gèle. Cela comprend la neige, la glace marine et la glace terrestre (glaciers et calottes glaciaires), la glace d'eau douce (glace de lac et de rivière), le pergélisol et le gélisol saisonnier. Le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC a évalué les changements dans la cryosphère dans le monde et a constaté, avec un *degré de confiance très élevé*, que presque tous les glaciers dans le monde ont continué à diminuer et que les Inlandsis du Groenland (*degré de confiance très élevé*) et de l'Antarctique (*degré de confiance très élevé*) ont perdu de la masse (basé sur deux décennies de données) (Vaughan et coll., 2013). Le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC a rapporté que, au cours de la période de 2003 à 2009, les plus grandes pertes des glaciers provenaient des glaciers en Alaska, dans le sud des Andes, dans les montagnes asiatiques, dans la périphérie de la calotte glacière du Groenland et dans l'Arctique canadien (Vaughan et coll., 2013).



L'on peut affirmer, avec un *degré de confiance très élevé*, que l'étendue de la glace marine dans l'Arctique (la nouvelle glace nouvellement formée et la glace pluriannuelles) s'est réduite au cours de la période de 1979 à 2012 et que des réductions se sont produites toutes les saisons, mais qu'elles étaient plus prononcées l'été et l'automne (*degré de confiance élevé*). La moyenne annuelle de l'étendue de glace marine dans l'Arctique a *très probablement* diminué à un taux de 3,5 % à 4,1 % par décennie sur cette période. L'étendue de la glace des mers de l'Antarctique a *très probablement* augmenté au cours de la même période à un taux de 1,2 % à 1,8 % par décennies. Les causes de la variation dans les propriétés et les tendances de la glace de l'Antarctique restent moins connues que celles pour l'Arctique. L'Organisation météorologique mondiale (2018) rapporte que, depuis l'augmentation rapportée en 2013, l'étendue de glaces des mers de l'Antarctique était à de bas niveaux records ou s'en rapprochait tout au long de 2017. L'on peut également affirmer, avec un *degré de confiance très élevé*, que l'étendue de la couverture neigeuse a diminué dans l'hémisphère nord (en particulier le printemps), et avec un *degré de confiance élevé* que les températures du pergélisol ont augmenté dans la plupart des régions depuis les années 1980, ce qui est lié au réchauffement régional. Globalement, la perte nette dans la masse de glace provenant de la cryosphère mondiale (en raison des changements dans les glaciers, les calottes glaciaires, les couvertures de neige, l'étendue de glace des mers, la période de fonte et l'épaisseur de la glace) est la preuve du fort réchauffement à de hautes latitudes (voir la figure 2.2) (Vaughan et coll., 2013). De plus amples détails sur ces changements et les implications selon une perspective canadienne se retrouvent dans le chapitre 5.

## Résumé de la section

En résumé, ces changements documentés dans l'atmosphère, les océans et la cryosphère depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (voir la figure 2.2), ainsi que des changements additionnels documentés dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, offrent un portrait fort et cohérent d'une planète qui se réchauffe, fondé sur de multiples sources de données indépendantes. Pour cette raison, le réchauffement du système climatique est robustement démontré; c'est-à-dire qu'il est sans équivoque.

### 2.3: Comprendre les causes des changements climatiques mondiaux observés

#### Message clé

Le réchauffement n'a pas été stable au fil du temps, alors que la variabilité climatique naturelle a ajouté au réchauffement causé par l'humain ou l'a réduit. Les périodes de réchauffement accrues ou réduites sont prévues sur des échelles de temps décennales et les facteurs qui causent le ralentissement du réchauffement au début du XXI<sup>e</sup> siècle sont maintenant mieux compris. Au cours des dernières années, la température moyenne mondiale s'est considérablement réchauffée, suggérant que le ralentissement du réchauffement est maintenant terminé.

#### Message clé

L'effet de rétention de la chaleur des gaz à effet de serre atmosphériques est bien établi. Il est **extrêmement probable** que les activités humaines, en particulier les émissions de gaz à effet de serre, sont la principale cause du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les facteurs naturels ne peuvent pas expliquer ce réchauffement observé. Qui plus est, des données probantes indiquant une influence humaine sur beaucoup d'autres changements au climat abondent également.

#### 2.3.1: Facteurs qui déterminent le climat mondial

Les scientifiques ont compris le fonctionnement de base du climat de la Terre depuis près de 200 ans. Des études au XIX<sup>e</sup> siècle ont déjà identifié le rôle clé de l'atmosphère de la Terre et du CO<sub>2</sub> dans la hausse de la température de la planète (Fourier, 1827; Tyndall, 1859; Arrhenius, 1896). Les composantes de base du système climatique, y compris les facteurs qui déterminent le climat et qui peuvent entraîner les changements climatiques, ont été comprises dans toutes les évaluations majeures du GIEC comme étant des renseignements généraux essentiels (GIAC, 1990, 1996, 2001, 2007, 2013a).

Le climat à long terme et la température moyenne de la Terre sont régulés par un équilibre entre l'énergie qui provient du soleil (sous la forme de rayonnement à courtes longueurs d'onde) et d'énergie qui quitte la Terre (sous la forme de rayonnement à grandes longueurs d'onde) (voir l'encadré 2.1). Quand cet équilibre est perturbé de manière persistante, la température mondiale s'élève ou chute. Les facteurs qui dérangent cet équilibre sont appelés « facteurs climatiques » ou « agents de forçage climatique », ce qui évoque leur influence dans le forçage du climat vers des conditions plus chaudes ou plus froides.

Leur effet sur l'équilibre d'énergie de la Terre est appelé « forçage radiatif », qui se définit comme le changement net dans l'équilibre d'énergie du système terrestre en raison de la perturbation externe. La force du forçage radiatif est mesurée en unités de watts par mètre carré ( $W/m^2$ ). Le forçage radiatif positif indique que l'excès d'énergie est retenu dans le système climatique – il y a moins d'énergie qui quitte le système qu'il n'en rentre – ce qui entraîne un climat plus chaud, alors qu'un forçage radiatif négatif indique que plus d'énergie quitte le système qu'il n'en rentre ce qui entraîne un climat plus froid (Le Treut et coll., 2007; Cubasch et coll., 2013). Le forçage radiatif offre un moyen utile de comparer et de classer l'influence des différents facteurs climatiques.

Les facteurs climatiques peuvent être naturels ou anthropiques – découlant des activités humaines. Le fait que la température moyenne et le climat de la Terre ont varié de manière importante sur le temps géologique indique que les facteurs naturels ont varié dans le passé. Sur des échelles de temps plus courtes de décennies et de siècles, les principaux facteurs climatiques sont les changements dans l'irradiation solaire, les éruptions volcaniques, les changements dans la composition atmosphérique et les changements à la superficie terrestre. Ces deux derniers sont influencés par les activités humaines. La façon dont les changements dans ces facteurs climatiques influencent le rayonnement incident et sortant est décrite ci-dessous.

## Encadré 2.1 : L'effet de serre et les facteurs du changement climatique

Le système climatique de la Terre est alimenté par l'énergie du soleil qui atteint la Terre sous la forme de la lumière du soleil. Une partie du rayonnement solaire est reflété dans l'espace, mais le reste est absorbé par l'atmosphère et la surface de la Terre, ce qui réchauffe la planète. La Terre se refroidit en émettant un rayonnement vers l'espace à un taux qui dépend de la température sur la Terre. Puisque la Terre est plus froide que le soleil, elle émet un rayonnement infrarouge dans la partie à faible énergie et à grandes longueurs d'onde du spectre de l'énergie (rayonnement infrarouge, invisible à l'œil humain), alors que le soleil émet principalement un rayonnement à haute énergie et à courtes longueurs d'onde (lumière visible et ultraviolette).

La température moyenne de la Terre est déterminée par l'équilibre global entre la quantité absorbée d'énergie incidente (sous forme de lumière) du soleil et la quantité d'énergie sortante (sous forme d'énergie infrarouge) de la Terre à l'espace. Seulement une partie de l'énergie incidente qui vient du soleil est utilisée pour réchauffer la Terre, puisqu'une partie est reflétée par l'atmosphère et la surface de la Terre. Environ deux tiers de l'énergie solaire incidente (environ  $240 W/m^2$ ) est absorbés et utilisés pour réchauffer la planète (Hartman et coll., 2013). Une partie du rayonnement infrarouge sortant (rayonnement thermique) est absorbé et réémis par les nuages et les GES dans la couche inférieure de l'atmosphère. Ce processus est connu sous le nom d'effet de serre et il entraîne la chaleur emmagasinée dans la couche inférieure de l'atmosphère ce qui réchauffe la surface de la Terre. Les GES qui se produisent naturellement dans l'atmosphère – principalement la vapeur d'eau et le  $CO_2$  venant de sources naturelles – produisent un effet de serre naturel qui élève la moyenne de la température à la surface de la Terre d'environ  $-16\text{ °C}$  à  $+15\text{ °C}$  (Lacis et coll., 2010). Cette température plus élevée crée des conditions favorables à la vie sur Terre et augmente aussi le flux de chaleur de la Terre à l'espace (jusqu'à environ  $240 W/m^2$ ) afin qu'il équilibre le flux venant de l'énergie solaire.

Dans un climat stable, la température moyenne mondiale reste relativement constante en raison de cet équilibre entre l'énergie incidente ou sortante. Par contre, l'équilibre de l'énergie de la Terre peut être perturbé. Les facteurs qui perturbent cet équilibre et entraînent un réchauffement ou un refroidissement du climat sont appelés facteurs climatiques ou agents de forçage climatique. Les facteurs climatiques peuvent être naturels ou causés par les humains. Ils peuvent perturber l'équilibre de l'énergie de la Terre en 1) changeant la quantité de rayonnement solaire incident; 2) changeant l'albédo de la Terre, c'est-à-dire la quantité de rayonnement solaire incident reflété par la surface et l'atmosphère de la Terre; et 3) changeant la quantité de rayonnement infrarouge en changeant la composition de l'atmosphère (voir la figure 2.3).

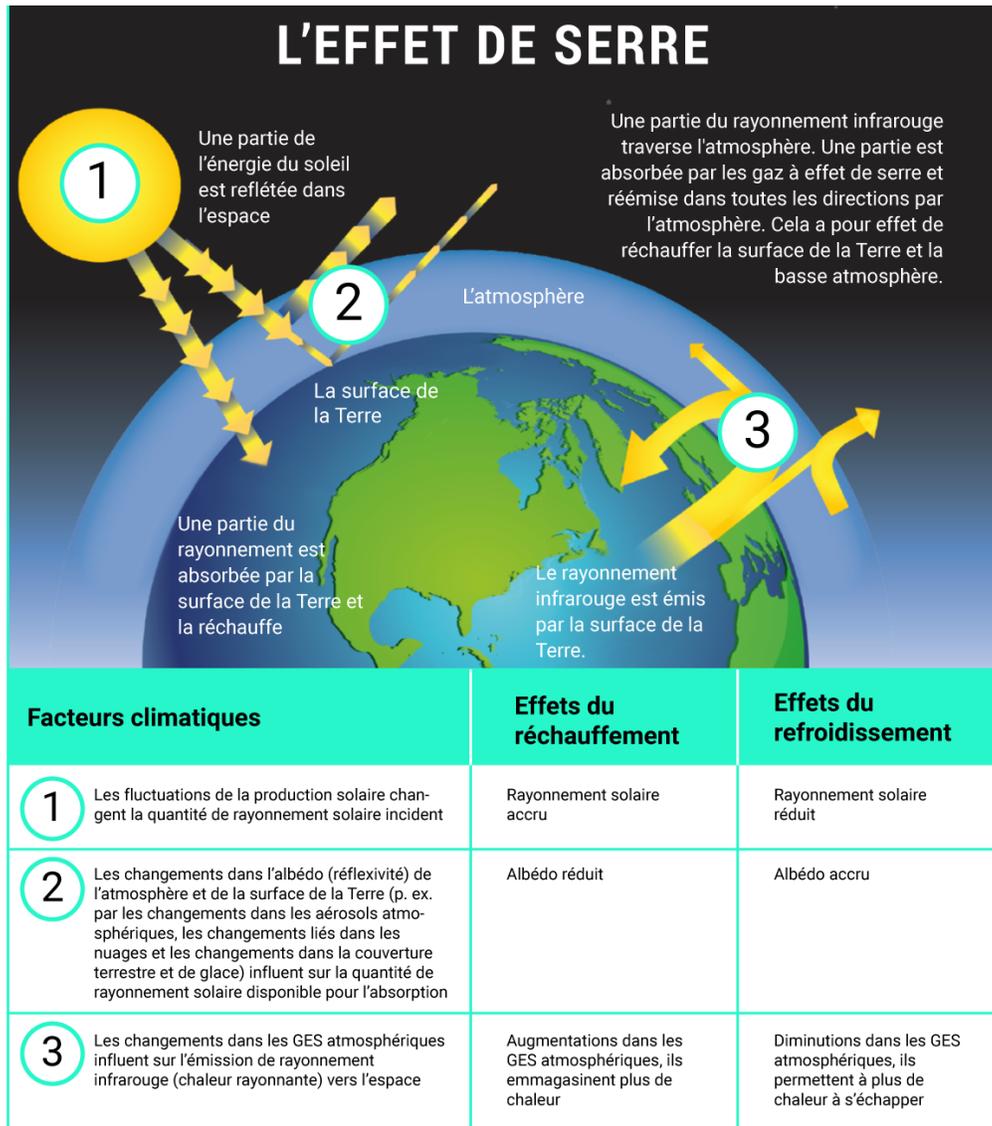


Figure 2.3: L'effet de serre et les principaux facteurs du changement climatique

Le soleil est la source d'énergie de la Terre (1). Une partie de l'énergie du soleil est reflétée dans l'espace (2), mais le reste est absorbé par l'atmosphère, les terres et les océans et réémis comme rayonnement à grandes longueurs d'onde (chaleur rayonnante). Une partie de cette chaleur rayonnante est absorbée et puis réémise par les gaz à effet de serre dans la couche inférieure de l'atmosphère ce qui emmagasine la chaleur dans celle-ci et réduit la quantité qui est envoyée dans l'espace. Ce processus est connu sous le nom d'effet de serre (3). Changements à la quantité de rayonnement solaire incident (1), la quantité de lumière solaire reflétée (2) et la capacité d'emmagasiner de la chaleur de l'atmosphère (3) entraînent le réchauffement du climat ou son refroidissement. Les facteurs qui entraînent de tels changements sont appelés facteurs climatiques ou agents de forçage climatique.

SOURCE DE LA FIGURE : PANNEAU SUPÉRIEUR : L'ACADÉMIE NATIONALE DES SCIENCES ET SOCIÉTÉ ROYALE (2014).

L'irradiation solaire, la force du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre, fluctue par une petite quantité sur un cycle solaire d'environ 11 ans et ces fluctuations peuvent expliquer les variations de la température mondiale jusqu'à environ 0,1 °C entre les parties les plus fortes et les plus faibles du cycle. De petites tendances multidécennales (qui augmentent et diminuent) dans l'irradiation solaire peuvent aussi se produire avec des effets tout aussi petits sur le climat mondial (Masson-Delmotte et coll., 2013).

Les éruptions volcaniques éjectent périodiquement de larges volumes de gaz et de poussières dans la stratosphère (couche supérieure de l'atmosphère). Les aérosols sulfatés (petites particules aéroportées) qui se forment à partir de ces gaz reflètent le rayonnement solaire et par conséquent provoquent un effet refroidissant<sup>8</sup>. Puisque les éruptions volcaniques sont épisodiques et que les aérosols sulfatés restent dans la stratosphère pour seulement quelques années, les effets refroidissants sont de courte durée. L'effet de refroidissement mondial des larges éruptions volcaniques, comme l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines en 1991, est clairement évident dans l'enregistrement de la température mondiale (voir la section 2.3.3 et la figure 2.9).

Les activités humaines influent sur la réflectivité de la Terre (albédo) en changeant la composition atmosphérique et la surface terrestre. Par exemple, la combustion des combustibles fossiles émet une variété de polluants, en plus des GES, dans la couche inférieure de l'atmosphère, où ils forment des aérosols de compositions chimiques diverses. Ces aérosols peuvent soit refléter ou absorber le rayonnement solaire et sont des facteurs importants des changements climatiques. Les aérosols dans la couche inférieure de l'atmosphère servent aussi comme particules sur lesquelles la vapeur d'eau peut se condenser pour former des nuages (noyaux de condensation des nuages). Les changements dans les concentrations d'aérosols peuvent par conséquent provoquer des changements dans les propriétés des nuages qui, à leur tour, peuvent influencer sur l'albédo de la Terre. Bien que les interactions entre les aérosols et les nuages soient complexes et comprennent plusieurs processus différents, une augmentation dans les concentrations en aérosol est connue pour produire des nuages plus clairs qui reflètent plus de rayonnement solaire ce qui provoque un effet refroidissant. Les modifications humaines de la surface terrestre ont aussi tendance à augmenter l'albédo. Quand les terres forestières sont défrichées pour la culture, cela a aussi tendance à produire des surfaces terrestres plus réfléchissantes (Le Treut et coll., 2007; Cubasch et coll., 2013).

Les changements dans l'irradiation solaire, les éruptions volcaniques et les changements dans l'albédo influent l'équilibre de l'énergie de la Terre en modifiant la quantité d'énergie incidente disponible pour réchauffer la Terre, mais les principaux facteurs de la quantité de chaleur qui quitte la Terre sont les changements à la composition chimique de l'atmosphère. Bien que les gaz les plus abondants dans l'atmosphère de la Terre – l'azote (78 %) et l'oxygène (21 %) – soient transparents au rayonnement sortant à grandes longueurs d'onde, ce qui permet à la chaleur de s'échapper vers l'espace, quelques gaz à l'état de trace absorbent le rayonnement à grandes longueurs d'onde ce qui crée l'effet de serre et ils sont appelés GES (voir l'encadré 2.1). Les GES ont des sources naturelles et humaines. Les principaux GES sont la vapeur d'eau, le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>), l'ozone (O<sub>3</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) et les groupes de composés chimiques synthétiques appelés halocarbures (voir l'encadré 2.2). Les changements aux concentrations atmosphériques de GES influent la transparence de l'atmosphère à la chaleur sortante. Les GES individuels se différencient dans leur capacité à emmagasiner la chaleur et la plupart sont des GES plus puissants que le CO<sub>2</sub>. Par contre, le CO<sub>2</sub> est de loin le GES (Myhre et coll., 2013) le plus abondant, à l'exception de la vapeur d'eau. L'accumulation de GES atmosphérique a réduit la perte de chaleur vers l'espace et est, par conséquent, un forçage radiatif positif avec un effet de réchauffement sur le système climatique (Le Treut et coll., 2007; Cubasch et coll., 2013).

---

8 Les volcans émettent aussi du CO<sub>2</sub>, un GES, mais l'effet climatique du CO<sub>2</sub> volcanique est faible (Myhre et coll., 2013).

## Encadré 2.2: Sources des principaux gaz à effet de serre

Les principaux gaz à effet de serre (GES) ont des sources naturelles et anthropiques – proviennent des activités humaines – à l'exception du groupe de GES appelé halocarbures qui sont fabriquées par l'humain. Puisque les sources anthropiques ajoutent des émissions à l'atmosphère à des taux supérieurs aux processus naturels qui peuvent les absorber, les niveaux atmosphériques de GES s'accumulent.

### Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), ainsi que le méthane ( $\text{CH}_4$ ), fait partie du cycle du carbone de la Terre qui implique le mouvement du carbone dans l'atmosphère, les terres, les océans et les êtres vivants. Le  $\text{CO}_2$  entre dans l'atmosphère à partir d'une variété de sources naturelles, en particulier à la suite de la respiration végétale et animale, et est retiré de l'atmosphère par la photosynthèse des plantes et l'absorption par les océans. Les principales sources anthropiques de  $\text{CO}_2$  sont la combustion de combustibles fossiles qui contiennent du carbone (charbon, pétrole et gaz naturel) et la déforestation ou le défrichement. Le défrichement peut inclure l'action de brûler les arbres et d'autres végétaux, ce qui relâche immédiatement du  $\text{CO}_2$ , ou laisser la végétation coupée se décomposer ce qui relâche lentement du  $\text{CO}_2$ . La fabrication du ciment est une autre importante source puisqu'elle comprend le chauffage du calcaire (carbonate de calcium), le principal composant du ciment, dans un processus qui relâche du  $\text{CO}_2$ .

### Méthane

Les principales sources de  $\text{CH}_4$  – un GES qui contient du carbone – sont la décomposition de matières organiques par des micro-organismes dans des conditions de faible teneur en oxygène. Les terres humides sont de loin la plus grande source naturelle de  $\text{CH}_4$ . Les sources anthropiques comprennent les rizières, les sites d'enfouissement et les eaux d'égout; la fermentation dans les intestins des animaux ruminants; et les terres humides artificielles. Comme d'autres polluants, le  $\text{CH}_4$  est aussi produit lorsque les combustibles fossiles et les arbres brûlent avec une teneur en oxygène insuffisante pour que la combustion soit complète. Il peut aussi avoir une fuite ou une décharge de méthane dans l'atmosphère à partir des sources géologiques, surtout pendant l'extraction, le traitement et le transport des combustibles fossiles bien que des fuites naturelles aient aussi lieu.

### Oxyde de diazote

L'oxyde de diazote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) fait partie du cycle de l'azote de la Terre. Les sources anthropiques sont principalement liées à l'utilisation de fertilisants synthétiques à base d'azote et de fumier pour améliorer la productivité et la culture de certaines espèces qui améliore la fixation biologique de l'azote. Ces sources ont ajouté des quantités importantes d'azote réactives dans les écosystèmes de la Terre, certains d'entre eux qui sont convertis en  $\text{N}_2\text{O}$  et diffusés dans l'atmosphère. Une partie du  $\text{N}_2\text{O}$  est aussi diffusée dans l'atmosphère pendant la combustion des combustibles fossiles et de la biomasse (p. ex. combustibles à base d'arbres ou de bois) et de quelques sources industrielles.

## Halocarbures

Les halocarbures sont un groupe de composés chimiques synthétiques qui contient un halogène (p. ex. le fluor, le chlore et le brome) et du carbone. Il y a un éventail de sources industrielles.

## Vapeur d'eau

La vapeur d'eau est le plus important GES qui se produit naturellement. Les activités humaines n'influencent pas directement la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère de façon significative. Par contre, la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère change avec la température et les changements dans la vapeur d'eau sont considérés comme une rétroaction dans le système climatique (voir l'encadré 2.3).

Déterminer la contribution relative des différents agents de forçage qui perturbent l'équilibre de l'énergie de la Terre offre une évaluation de premier ordre utile des causes des changements climatiques observés (voir la section 2.2). Par contre, le système climatique ne répond pas de manière directe aux changements dans le forçage radiatif. Une perturbation initiale peut déclencher des rétroactions dans le système climatique qui altère la réponse. Ces rétroactions climatiques peuvent amplifier l'effet du forçage initial (rétroaction positive) ou les atténuer (rétroaction négative). Par conséquent, les rétroactions positives dans le système climatique sont une cause de préoccupation puisqu'elles amplifient le réchauffement d'un forçage positif initial, par exemple, les augmentations dans les concentrations atmosphériques de GES.

Il y a un grand nombre de rétroactions dans le système climatique, opérant sur un grand éventail d'échelles du temps, allant des heures aux siècles (Cubasch et coll., 2013; voir, en particulier, la figure 1.2 et le texte associé dans cette référence). D'importantes rétroactions positives qui ont contribué au réchauffement au cours de l'ère industrielle comprennent la rétroaction sur la vapeur d'eau (vapeur d'eau, un fort GES, qui augmente avec le réchauffement climatique) et la rétroaction de l'albédo de la neige et de la glace (la neige et la glace diminuent avec le réchauffement climatique ce qui diminue l'albédo) (voir l'encadré 2.3). L'on peut affirmer, avec un *degré de confiance très élevé*, que la rétroaction nette – c'est-à-dire la somme des rétroactions importantes qui opèrent sur des échelles de siècles – est positive ce qui amplifie le réchauffement mondial (Flato et coll., 2013; Fahey et coll., 2017). On s'attend à ce que certaines rétroactions deviennent de plus en plus importantes alors que le réchauffement climatique continue pendant ce siècle et par la suite. Cela comprend les rétroactions qui changent la rapidité à laquelle les terres et les océans peuvent absorber le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et ceux qui peuvent mener à des émissions additionnelles de CO<sub>2</sub> et d'autres GES comme la fonte du pergélisol (Ciais et coll., 2013; Fahey et coll., 2017) (voir le chapitre 5, section 5.6).

## Encadré 2.3: Rétroactions positives qui amplifient les changements climatiques

### La rétroaction de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau est un gaz à effet de serre (GES), puisqu'il absorbe le rayonnement sortant à grandes longueurs d'onde (rayonnement thermique) de la Terre. Au contraire d'autres GES, comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et le méthane, les niveaux de vapeur d'eau dans l'atmosphère ne peuvent pas être contrôlés ou modifiés directement par les activités humaines. À la place, la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est une fonction de la température de l'atmosphère. Il y a une limite physique à la quantité de vapeur d'eau que l'air peut contenir à une température donnée, avec l'air chaud qui a la capacité à contenir plus d'humidité que l'air froid. Pour chaque degré Celsius additionnel dans la température de l'air, l'atmosphère peut contenir environ 7 % plus de vapeur d'eau. Lorsque l'air devient saturé de vapeur d'eau, la vapeur d'eau se condense et tombe sous forme de pluie ou de neige ce qui signifie que la vapeur d'eau ne reste pas longtemps dans l'atmosphère. Lorsqu'un agent de forçage externe, comme les augmentations de CO<sub>2</sub> atmosphérique, provoque un réchauffement climatique, l'augmentation de la température augmente l'évaporation de l'eau à la surface de la Terre et augmente les concentrations de vapeur d'eau atmosphérique. Cette vapeur d'eau augmentée, à son tour, amplifie le réchauffement du forçage initial causé par le CO<sub>2</sub>. Par conséquent, la vapeur d'eau offre une rétroaction climatique forte et positive en réponse aux changements amorcés par les émissions humaines de GES (Boucher et coll., 2013).

### La rétroaction de l'albédo de la neige et de la glace

La neige et la glace sont des surfaces brillantes et hautement réfléchives. Alors que l'eau libre reflète seulement 6 % du rayonnement solaire incident et absorbe le reste, la glace des mers recouverte de neige réfléchit près de 90 % du rayonnement incident. Cette valeur diminue de 40 % à 70 % pendant la saison de la fonte en raison des étangs de fonte à la surface de la glace (voir la figure 2.4; Perovich et coll., 1998; Perovich et coll., 2007). Le réchauffement climatique réduit la quantité de neige et de glace qui couvre la Terre ce qui réduit l'albédo de la Terre (réflexibilité). Des surfaces terrestres et aquatiques plus sombres exposées par la neige et la glace fondues absorbent plus de rayonnement solaire incident, ce qui ajoute plus de chaleur au système climatique et amplifie le réchauffement initial ce qui, à son tour, fait fondre plus de neige et de glace. L'absorption augmentée de l'énergie solaire sur les océans est particulièrement importante, puisque cette chaleur additionnelle doit être dissipée à l'automne avant que la glace puisse se former à nouveau ce qui par conséquent ralentit la date du gel. Cette rétroaction climatique positive est particulièrement importante dans l'hémisphère nord, où le déclin dans le manteau neigeux et la glace des mers de l'océan Arctique est grand (voir le chapitre 5, sections 5.2 et 5.3). En combinaison avec d'autres rétroactions qui comprennent l'océan, l'atmosphère et les nuages, la rétroaction de l'albédo de la neige et la glace, elles expliquent pourquoi les températures dans l'ensemble de l'Arctique se sont réchauffées à près du double du taux du reste de la planète (Overland et coll., 2017; Pithan et Mauritsen, 2014; Serreze et Barry, 2011).

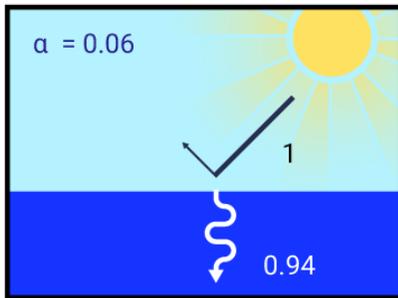
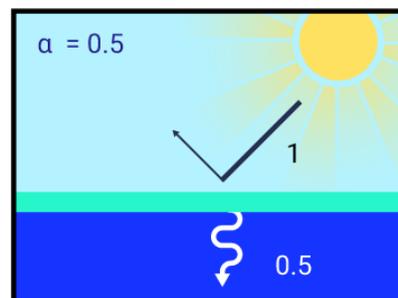
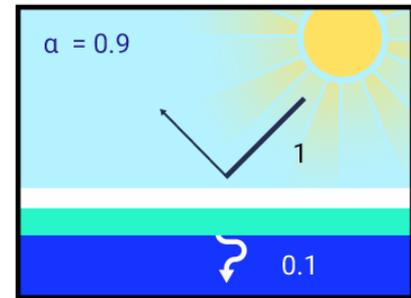
**I. Océan libre de glace****II. Glace vive****III. Glace avec neige**

Figure 2.4: La neige et la glace changent l'albédo de la Terre

L'albédo est une quantité sans unité qui indique dans quelle mesure une surface réfléchit l'énergie solaire. L'albédo ( $\alpha$ ) varie de 0 à 1 avec 0 qui représente une surface noire qui absorbe 100 % de l'énergie et 1 qui représente une surface blanche qui réfléchit 100 % de l'énergie. La présence de la glace, et dans une plus grande mesure de l'étendue de glace couverte par la neige, sur des surfaces sombres (comme les océans) augmente l'albédo.

SOURCE DE LA FIGURE : NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. THERMODYNAMICS : ALBEDO; DANS ALL ABOUT SEA ICE; NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. [HTTPS://NSIDC.ORG/CRYOSPHERE/SEAICE/PROCESSES/ALBEDO.HTML](https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html) [10 JUILLET 2018]

## Résumé de la section

En résumé, les facteurs principaux du climat de la Terre sont par conséquent bien connus tout comme les propriétés radiatives et les effets d'emmagasinage de la chaleur des GES dans l'atmosphère de la Terre. La première évaluation scientifique réalisée par le groupe de travail 1 du GIEC (GIEC, 1990) a commencé avec l'énoncé que « nous sommes certains qu'il y a un effet de serre naturel qui garde déjà la Terre plus chaude qu'elle ne devrait l'être » et « nous sommes certains que les émissions qui proviennent des activités humaines augmentent de manière importante les concentrations atmosphériques de GES et ces augmentations amélioreront l'effet de serre ce qui entraînera en moyenne un réchauffement supplémentaire de la surface de la Terre. » Les connaissances scientifiques ont énormément grandi dans les années suivant cette évaluation, alors que les scientifiques continuent d'approfondir leur compréhension de la multitude de processus au sein des composantes du système climatique et les interactions parmi ces composantes qui influent la réponse du système climatique aux facteurs climatiques. Par contre, la relation fondamentale entre les augmentations en GES et le réchauffement du climat est bien établie.

## 2.3.2: Variations dans les concentrations de gaz à effet de serre et modifications du forçage radiatif au cours de l'ère industrielle

L'ère industrielle réfère à la période dans l'histoire qui commence autour du XVIII<sup>e</sup> siècle et qui continue aujourd'hui, marquée par l'augmentation rapide de l'activité industrielle alimentée par la combustion des combustibles fossiles. La combustion des combustibles contenant du carbone entraîne la libération de CO<sub>2</sub> ainsi que d'autres gaz et polluants dans l'atmosphère. L'ère industrielle est reconnue comme la période pendant laquelle l'activité humaine a influé de manière importante la composition chimique de l'atmosphère en augmentant la concentration des gaz à l'état de trace, y compris les GES (Steffen et coll., 2007).

### 2.3.2.1: Variations dans les concentrations de gaz à effet de serre au cours de l'ère industrielle

Les GES sont émis dans l'atmosphère à partir de sources naturelles et humaines (voir l'encadré 2.2) et sont aussi retirés de l'atmosphère principalement par des processus naturels appelés « puits » naturels. Les concentrations atmosphériques des GES augmentent lorsque le taux d'émission vers l'atmosphère dépasse le taux d'absorption. Même un petit déséquilibre annuel, dans lequel les émissions dépassent les absorptions peut mener à une grande accumulation de gaz dans l'atmosphère au fil du temps (de la même façon qu'un léger déficit annuel dans un budget financier peut mener à une grande accumulation de dettes au fil du temps). Les puits et les déséquilibres sont différents selon le type de GES. Le CH<sub>4</sub> est retiré de l'atmosphère principalement par des réactions photochimiques qui le détruisent chimiquement. Ces réactions absorbent aussi presque autant de CH<sub>4</sub> chaque année qu'il y en a d'émis par les sources naturelles et humaines ce qui laisse un petit excès d'émissions (Ciais et coll., 2013; Saunio et coll., 2016). En revanche, seulement la moitié de CO<sub>2</sub> émis des activités humaines chaque année est retiré de l'atmosphère par les puits terrestres (principalement l'absorption par les plantes pendant la photosynthèse) et les puits océaniques (principalement par le CO<sub>2</sub> qui se dissout dans l'océan) (Ciais et coll., 2013; Le Quéré et coll., 2016). Ces excès annuels continus de CO<sub>2</sub> émis par les humains sont la cause de la hausse observée dans les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique (voir la FAQ 2.1).

#### FAQ 2.1: Les humains sont-ils responsables de l'élévation observée du dioxyde de carbone atmosphérique?

De multiples sources de données indépendantes montrent avec un *degré de confiance élevé* que les activités humaines sont responsables de la hausse observée dans le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) depuis 1750 et que cette hausse est incohérente avec les sources naturelles.

Le cycle du carbone comprend le mouvement du carbone entre les différents réservoirs sur Terre – l'atmosphère, les océans, la biosphère terrestre et la croûte terrestre de la Terre, y compris les réserves de combustibles fossiles. Bien que le carbone se déplace de façon naturelle à l'intérieur de ces réservoirs, la quantité totale de carbone sur Terre reste essentiellement constante. Au cours des 10 000 ans qui précèdent l'ère industrielle, ce cycle naturel du carbone était plus ou moins en équilibre, et des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> restaient presque stables. Depuis le commencement de l'ère industrielle, le CO<sub>2</sub>

dans l'atmosphère a rapidement augmenté. Pendant la période de 1750 à 2011, la hausse atmosphérique était de 240 Pg<sup>9</sup> (plage d'incertitude de 90 % allant de 230 Pg à 250 Pg) de carbone (C), comme montré dans les échantillons d'air des carottes de glace et par la mesure directe des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis 1958. De quelle façon savons-nous que cette hausse mesurée est causée par les activités humaines plutôt que par les changements dans le cycle naturel de carbone?

À partir de nos enregistrements, nous savons que les humains ont émis 375 Pg C (plage d'incertitude de 90 % allant de 345 Pg C à 405 Pg C) dans l'atmosphère qui proviennent de la combustion des combustibles fossiles et de la fabrication de ciment et nous pouvons estimer que les changements d'affectation des terres par les humains (y compris la déforestation et la reforestation) ont contribué à 180 Pg C supplémentaires (plage d'incertitude de 90 % allant de 100 Pg C à 260 Pg C) à l'atmosphère sur la période de 1750 à 2011. Ensemble, ces émissions humaines totalisent 555 Pg C (plage d'incertitude de 90 % allant de 470 Pg C à 640 Pg C). Puisque nous savons que l'augmentation dans le CO<sub>2</sub> atmosphérique (240 Pg C) était moins que ce montant, il est logique que le système naturel ait dû être un puits net de carbone au cours de cette période. C'est ce qu'on appelle la « méthode de comptabilité », qui constitue une preuve solide que les émissions d'origine anthropique sont responsables de l'augmentation observée du CO<sub>2</sub> atmosphérique, plutôt que celles provenant de sources naturelles. Il y a aussi des preuves directes que les réservoirs naturels individuels ont agi comme puits pour le carbone atmosphérique. Par exemple, le carbone mesuré dans les océans est estimé avoir augmenté de 155 Pg C (plage d'incertitude de 90 % allant de 125 Pg C à 185 Pg C), ce qui entraîne l'acidification des océans (voir le chapitre 7, section 7.6.1).

Des preuves géochimiques indépendantes confirment que l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique était principalement causée par la consommation de combustibles fossiles et qu'elle ne provient pas de sources naturelles (voir la figure 2.5). Des mesures directes à partir des années 1990 montrent une petite diminution dans les concentrations d'oxygène (O<sub>2</sub>) atmosphérique, ce qui est cohérent avec la combustion des combustibles fossiles (puisque l'O<sub>2</sub> est consommé pendant la combustion), mais elle est incohérente avec une source naturelle non oxydante de CO<sub>2</sub> comme les océans et les volcans. De plus, les plantes et les combustibles fossiles (provenant d'anciennes plantes) ont des ratios faibles d'isotope 13C et 12C stables que l'atmosphère ce qui signifie que ces sources sont relativement appauvries en isotope 13C. La combustion des combustibles fossiles et des plantes émet du carbone (principalement du CO<sub>2</sub>) vers l'atmosphère avec des niveaux en 13C appauvris. Cela réduit le ratio 13C/12C du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Les mesures confirment que c'est ce qui se produit. La hausse observée de CO<sub>2</sub> atmosphérique, la diminution d'O<sub>2</sub> et la diminution du 13C/12C sont plus grandes dans l'hémisphère nord, ce qui est cohérent avec les sources d'émissions majeures de combustibles fossiles. Ensemble, ces sources de données produisent un **degré de confiance élevé** à l'égard du fait que les augmentations observées dans le CO<sub>2</sub> atmosphérique sont le résultat de l'activité humaine (Ciais et coll., 2013).

9 1 pétagramme (Pg) = 1015 grammes. 1 pétagramme est l'équivalent à 1 milliard de tonnes métriques (1 gigatonne). Dans l'atmosphère, la masse de carbone est directement liée à l'abondance de CO<sub>2</sub> par unité de volume, mesurée en partie par million (ppm).

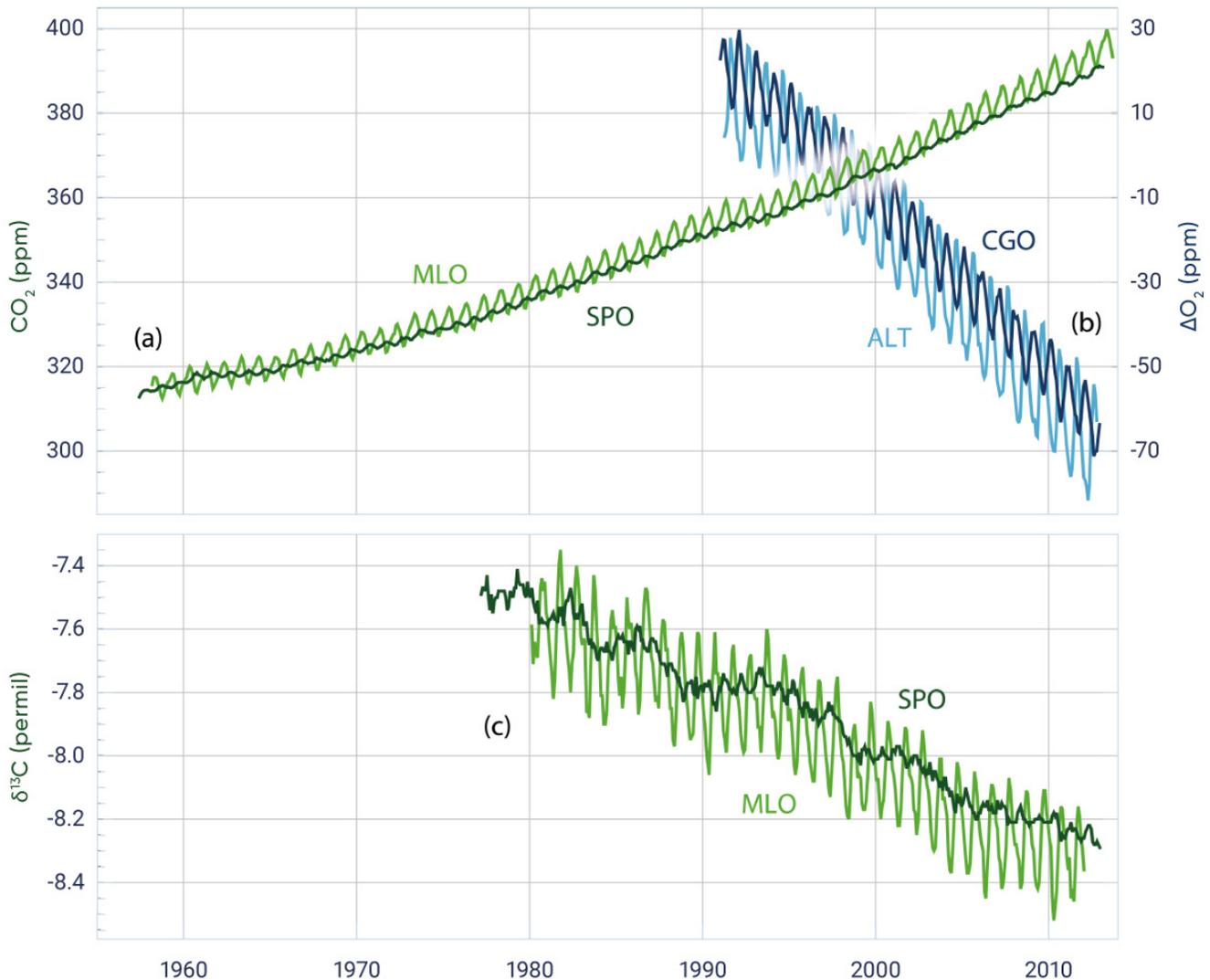


Figure 2.5 : Changements dans la composition de l'atmosphère indiquant une augmentation du dioxyde de carbone d'origine humaine

Concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de l'oxygène ( $\text{O}_2$ ) et des rapports isotopiques stables  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de  $\text{CO}_2$  enregistré au cours des dernières décennies aux stations représentatives. Graphique du haut :  $\text{CO}_2$  (ligne verte) des stations atmosphériques Mauna Loa dans l'hémisphère nord (MLO) et au pôle Sud dans l'hémisphère sud (SPO), et  $\text{O}_2$  (ligne bleue) de Alert dans l'hémisphère nord (ALT) et de Cape Grim dans l'hémisphère sud (CGO). Graphique du bas :  $\delta^{13}\text{C}$  en  $\text{CO}_2$  de MLO et SPO. Le rapport entre les isotopes  $^{13}\text{C}$  et  $^{12}\text{C}$ , par rapport à une norme, est mesuré par  $\delta^{13}\text{C}$  (delta C 13), qui est défini comme  $\delta^{13}\text{C} = [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{échantillon}} / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{norme}} - 1] \times 1\,000$ , et a les unités de permil. On dit que les échantillons qui ont une valeur de  $\delta^{13}\text{C}$  plus grande sont enrichis, tandis que les échantillons ayant une valeur  $\delta^{13}\text{C}$  plus faible sont épuisés.

SOURCE DE LA FIGURE : CIAIS ET COLL., 2013. LA FIGURE 6-3 A ÉTÉ MODIFIÉE POUR INCLURE SEULEMENT LES DEUX GRAPHIQUES DU HAUT.

Les GES bien mélangés sont ceux qui persistent dans l'atmosphère pendant suffisamment longtemps pour que les concentrations deviennent relativement uniformes partout dans l'atmosphère. Pour ces substances, les émissions produites n'importe où influent sur les concentrations atmosphériques n'importe où. Les concentrations moyennes mondiales des GES peuvent être déterminées à partir de mesures prises uniquement à quelques-uns des emplacements de surveillance retrouvés partout dans le monde. Le Canada surveille les concentrations de GES à certains endroits, et ces données, ainsi que celles provenant d'autres stations de surveillance, sont utilisées pour déterminer la concentration moyenne mondiale de GES (voir l'encadré 2.4).

## Encadré 2.4: Surveillance au Canada des gaz à effet de serre atmosphériques

Le Programme canadien de mesure des émissions de gaz à effet exploite des stations qui surveillent précisément les niveaux dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (GES), de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) dans toutes les régions du pays. Le site le plus éloigné, situé à Alert, au Nunavut, contribue aux mesures du programme Veille de l'atmosphère du globe, de l'Organisation météorologique mondiale, qui fait le suivi des changements dans les concentrations de GES dans le monde. Les concentrations de GES retrouvées dans l'hémisphère Nord, comme celles enregistrées à des sites canadiens, sont légèrement plus élevées que la moyenne mondiale en raison de plus grandes sources d'émissions dans l'hémisphère Nord. Les tendances à long terme pour tous les sites canadiens font un suivi étroit de la tendance à la hausse de la concentration du  $\text{CO}_2$  dans le monde, tout en montrant clairement des cycles saisonniers de la concentration de  $\text{CO}_2$  attribuables à la photosynthèse des plantes (les plantes retirent le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère) et la respiration biosynthétique des plantes et des animaux (ils expirent le  $\text{CO}_2$ ) (voir la figure 2.6).

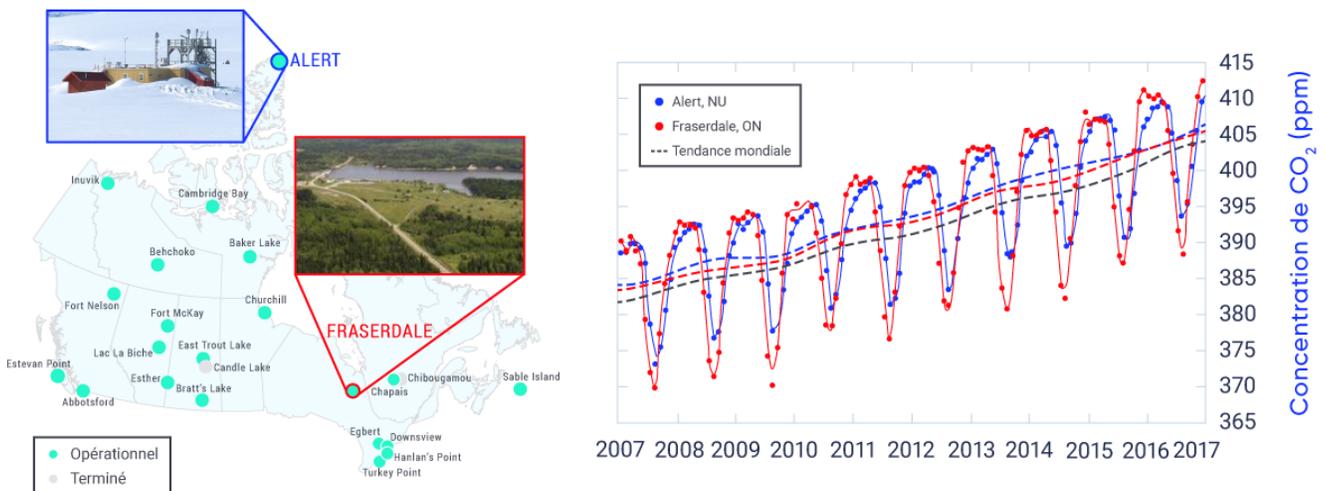


Figure 2.6 : Réseau de surveillance des gaz à effet de serre du Canada

Réseau de surveillance des émissions de gaz à effet de serre (GES) (carte) et observations d'exemples pour le dioxyde de carbone (lot) à Alert, au Nunavut (en haut de la photo) et à Fraserdale, en Ontario (en bas de la photo).

Les sites de surveillance au Canada servent également à faire le suivi des changements liés aux émissions et aux réductions régionales des GES en raison de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes vulnérables, comme la toundra et la forêt boréale. La vaste forêt boréale canadienne (2,7 millions de km<sup>2</sup>) absorbe habituellement 28 mégatonnes de carbone nettes de l'atmosphère par année (Kurz et coll., 2013). Fraserdale, situé à proximité de la forêt boréale, est fortement influencé par les processus forestiers, qui influent sur les niveaux atmosphériques de CO<sub>2</sub>. Une diminution des concentrations de CO<sub>2</sub> est évidente en été (dominée par la photosynthèse) et des concentrations plus élevées sont évidentes en hiver (dominées par la respiration) par rapport à Alert, le site le plus éloigné, qui n'est pas entouré par une végétation importante. La recherche a révélé que la quantité nette de carbone absorbée dans la forêt boréale canadienne a augmenté au cours des années chaudes (Chen et coll., 2006). En revanche, des études portant sur les forêts boréales scandinaves ont révélé que l'absorption nette de carbone a diminué au cours des dernières années (c'est-à-dire, entre 1999 et 2013) (Hadden et Grelle, 2016). Cela fait ressortir la valeur de la réalisation d'observations atmosphériques précises dans la forêt boréale canadienne. De plus, les observations atmosphériques de CH<sub>4</sub> dans l'Arctique pourraient permettre la détection des changements rapides dans les émissions causés par la fonte du pergélisol.

En résumé, les observations atmosphériques jouent un rôle clé pour le suivi des tendances mondiales en matière de concentrations des GES, dans la surveillance des changements résultant des efforts mondiaux d'atténuation des GES, et dans la compréhension des rétroactions liées au climat pour les écosystèmes canadiens.

Des observations à long terme des changements aux concentrations atmosphériques des trois principaux gaz à effet de serre bien mélangés – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O – sont compilées à partir de mesures atmosphériques directes (à compter de la fin des années 1950 pour le CO<sub>2</sub> et de la fin des années 1970 pour les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O) et des mesures de carottes de glace, qui fait remonter la période d'analyse à des centaines de milliers d'années. Les données probantes montrent clairement que les concentrations de ces GES ont augmenté considérablement au cours de l'ère industrielle, de 40 % pour le CO<sub>2</sub>, de 150 % pour le CH<sub>4</sub>, et de 20 % pour le N<sub>2</sub>O (Hartman et coll., 2013) (voir la figure 2.7). Les concentrations mondiales des principaux GES en 2015 étaient environ de 400 parties par million pour le CO<sub>2</sub>, de 1 845 parties par milliard pour le CH<sub>4</sub> et de 328 parties par milliard pour le N<sub>2</sub>O (OMM, 2016). Ces concentrations ont dépassé les concentrations les plus élevées des 800 000 dernières années retrouvées dans les carottes de glace (Masson-Delmotte, C. et coll., 2013).

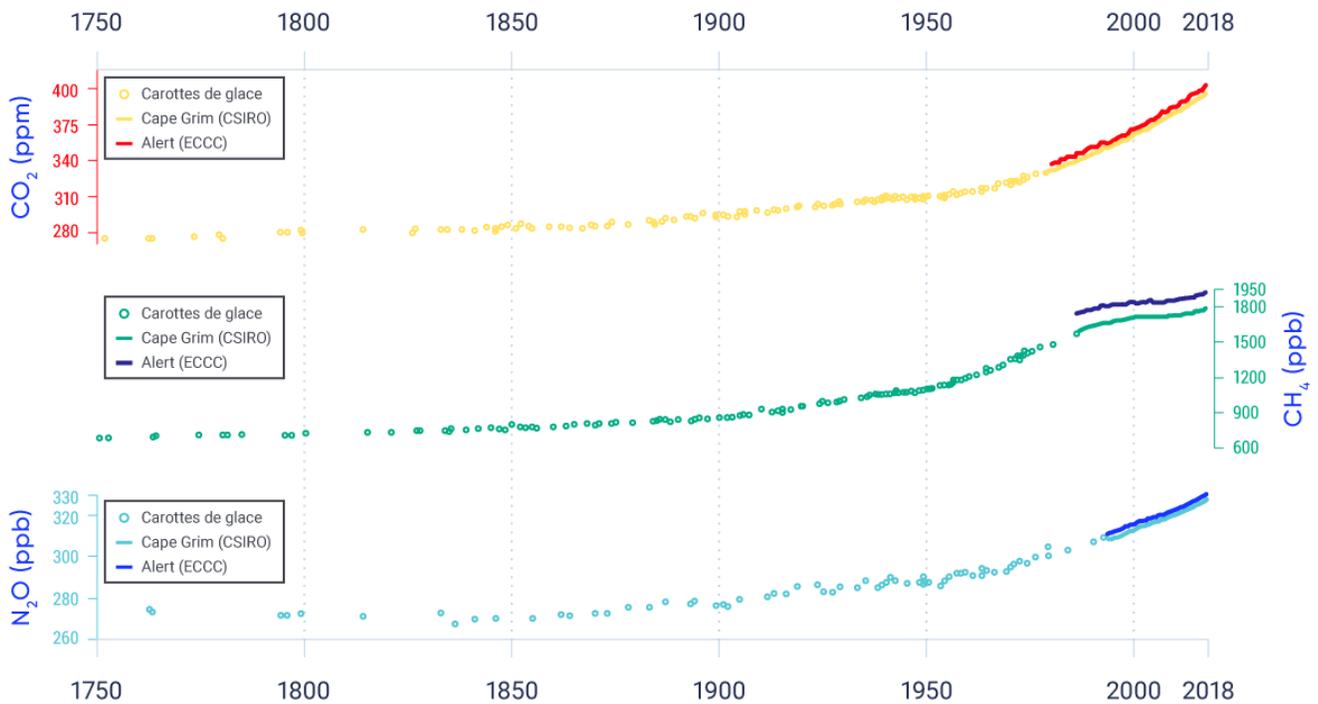


Figure 2.7: Augmentation des concentrations mondiales de gaz à effet de serre au cours de l'ère industrielle

Légende de la figure : Les concentrations atmosphériques moyennes mondiales de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) (jaune et rouge), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) (aqua et foncé) et d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (bleu pâle et foncé), selon les données provenant des carottes de glace (points) et des mesures atmosphériques directes provenant de l'observatoire Cape Grim, en Australie (lignes pâles) et du site canadien de surveillance des gaz à effet de serre d'Alert, au Nunavut (lignes foncées).

SOURCE DE LA FIGURE : DIRECTION DE LA RECHERCHE CLIMATIQUE, ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA.

### 2.3.2.2: Modification du forçage radiatif au cours de l'ère industrielle

Tel qu'il a été discuté à la section 2.3, la modification des concentrations atmosphériques GES produit un forçage radiatif. La compréhension actuelle des effets du forçage radiatif de tous les agents de forçage climatique importants au cours de l'ère industrielle est résumée à la figure 2.8. La discussion qui suit met en évidence les principales caractéristiques de la

figure 2.8,<sup>10</sup> et commence par ces agents qui causent un effet de réchauffement, suivi par ces agents qui causent un effet de refroidissement, et se termine par un résumé sur les effets de forçage nets liés à l'activité humaine.

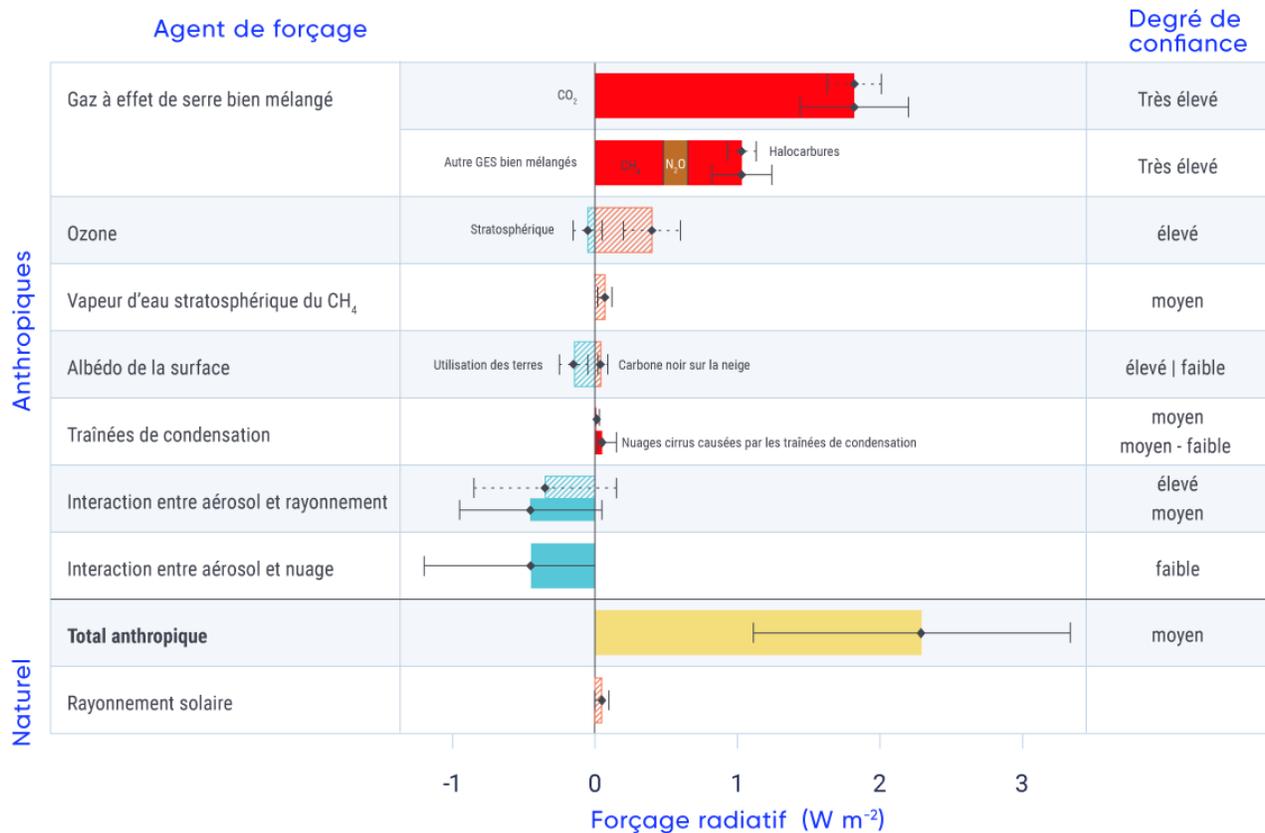


Figure 2.8 : Forçage naturel et anthropique du climat, de 1750 à 2011

Forçage radiatif (FR; le changement net dans le bilan énergétique du système terrestre en raison d'une perturbation de l'extérieur), selon le changement de concentrations des agents forçant, entre 1750 et 2011 (Myhre et coll., 2013), exprimées en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>). Les barres hachurées représentent le forçage radiatif (FR), les barres solides représentent le forçage radiatif effectif (FRE), le FR, une fois que l'on tient compte des ajustements rapides des températures atmosphériques, de la vapeur d'eau et des nuages dans la perturbation initiale. Les incertitudes (plage d'incertitude de 5 % à 95 %) sont données pour le FRE (lignes horizontales solides [moustaches]) et le FR (moustaches pointillées). Le nombre total de forçages anthropiques est la somme des contributions du forçage anthropique. Voir la description à la section 2.2.

SOURCE DE LA FIGURE : BASÉ SUR MYHRE ET COLL., 2013, FIGURE 8.15; ET GIEC, 2013A, FIGURE TS.6..

10 Le terme « forçage radiatif effectif » a été introduit dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC afin de mieux quantifier les répercussions des agents de forçage en tenant compte des rajustements rapides du système climatique vers un forçage radiatif initial (Myhre et coll., 2013). Pour les GES bien mélangés, les valeurs du forçage radiatif (FR) et du forçage radiatif effectif (FRE) sont semblables, alors que pour les aérosols provenant de l'activité humaine, ces valeurs sont très différentes, et le FRE est considéré comme étant le meilleur indicateur. Dans cette section, nous utilisons le terme FR, mais nous établissons une distinction entre ces termes à la figure 2.8, sur laquelle est fondé le texte.

Les principaux agents de réchauffement, comme l'indiquent les barres se prolongeant vers la droite de la figure 2.8, sont le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$ , le  $\text{N}_2\text{O}$ , et l'ozone troposphérique, ainsi que quelques autres gaz qui contribuent à de petits effets de réchauffement à l'échelle mondiale. Ces autres gaz comprennent les halocarbures – produits chimiques industriels synthétiques composés de carbone et d'halogène, comme les chlorofluorocarbures. Ensemble, les GES ont été de loin l'agent de forçage positif dominant au cours de l'ère industrielle. Le  $\text{CO}_2$  à lui seul représente les deux tiers du forçage ( $1,82 \text{ W/m}^2$  [plage d'incertitude de 90 % allant de  $1,63 \text{ W/m}^2$  à  $2,01 \text{ W/m}^2$ ]) de tous les GES bien mélangés ( $2,83 \text{ W/m}^2$  [plage d'incertitude de 90 % allant de  $2,54 \text{ W/m}^2$  à  $3,12 \text{ W/m}^2$ ]). L'augmentation des concentrations de  $\text{CH}_4$  a été le deuxième plus important contributeur du forçage positif ( $0,48 \text{ W/m}^2$  [plage d'incertitude de 90 % allant de  $0,43 \text{ W/m}^2$  à  $0,53 \text{ W/m}^2$ ]). Il y a un degré de confiance très élevé dans ces valeurs, parce que les propriétés radiatives des GES bien mélangés sont bien connues et parce que les concentrations historiques de GES bien mélangés sont également bien connues de carottes de glace et des mesures directes.

L'ozone n'est pas émis directement, mais est formé dans la couche inférieure de l'atmosphère (troposphère) à la suite de processus naturels et de l'émission de gaz polluant l'atmosphère, y compris de  $\text{CH}_4$ . L'effet de réchauffement lié aux augmentations de l'ozone troposphérique est assez important et est connu avec un **degré de confiance élevé**. En outre, l'ozone se forme naturellement dans la haute atmosphère (stratosphère) à la suite de réactions chimiques mettant en cause les rayons ultraviolets et les molécules d'oxygène. Les niveaux d'ozone stratosphérique ont diminué à la suite des émissions anthropiques de substances appauvrissant la couche d'ozone comme les réfrigérants. L'effet de refroidissement a légèrement compensé l'effet de réchauffement lié à l'augmentation de l'ozone troposphérique (Myhre et coll., 2013).

Les effets de refroidissement (tel que l'indiquent les barres situées à gauche dans la figure 2.8) ont été poussés par les émissions anthropiques, qui ont augmenté les concentrations d'aérosols dans l'atmosphère, et par les changements humains à la surface terrestre qui ont augmenté l'albédo de la surface de la Terre. Les aérosols sont divisés en deux composantes : les effets directs, provenant principalement de l'absorption ou de la diffusion du rayonnement solaire qui arrive, et les effets indirects de l'interaction des aérosols sur les nuages. La plupart des aérosols (p. ex. les aérosols composés de sulfates et de nitrates) dispersent principalement (reflètent) le rayonnement. En revanche, le carbone noir, aérosol émis à la suite de la combustion incomplète de combustibles à base de carbone, absorbe le rayonnement. Le carbone noir est un agent de réchauffement fort, bien que le calcul de l'effet net des sources d'émission du carbone noir doive tenir compte des effets de réchauffement et de refroidissement des autres aérosols et gaz émis en même temps pendant la combustion (Bond et coll., 2013; voir le chapitre 3, encadré 3.3). L'effet direct des aérosols est donc composé d'un forçage négatif (refroidissement) provenant de la plupart des aérosols et d'un forçage positif (réchauffement) provenant du carbone noir, pour un forçage négatif net de  $0,45 \text{ W/m}^2$  (plage d'incertitude de 90 % allant d'un forçage négatif de  $0,95 \text{ W/m}^2$  à un forçage positif de  $0,05 \text{ W/m}^2$ )<sup>11</sup> (**degré de confiance moyen**). L'effet total des aérosols dans l'atmosphère, y compris les interactions entre les aérosols et les nuages, est un forçage fortement négatif, estimé avec un **degré de confiance moyen**, de  $0,9 \text{ W/m}^2$  (plage d'incertitude de 90 % de  $1,9 \text{ W/m}^2$  à  $0,1 \text{ W/m}^2$ ). Même s'il y a encore de grandes incertitudes associées à l'ampleur du forçage des aérosols, dans l'ensemble, on peut affirmer avec un **degré de confiance élevé** que l'effet de refroidissement des aérosols a compensé une partie importante de l'effet de réchauffement lié au forçage des GES.

On peut également affirmer avec un **degré de confiance élevé** que les modifications survenues dans l'utilisation des sols causés par les humains (comme le déboisement et la conversion des autres paysages naturels en terres aménagées) ont eu un effet de refroidissement en augmentant l'albédo de la Terre, avec un forçage négatif de  $0,15 \text{ W/m}^2$  (plage d'incertitude de 90 % allant de  $0,25 \text{ W/m}^2$  à  $0,05 \text{ W/m}^2$ ). Toutefois, cette situation a été partiellement compensée par des diminutions dans l'albédo de la Terre en raison de dépôts de carbone noir sur la neige et la glace, noircissant la surface et augmentant de ce fait l'absorption du rayonnement solaire. On estime que les dépôts de carbone noir sur la neige ont exercé un effet de

11 Cette valeur représente le forçage radiatif effectif (FRE) des effets directs des aérosols et tient compte des ajustements rapides du système climatique (voir la figure 2.8).

réchauffement moindre de  $0,04 \text{ W/m}^2$  (90 % de la plage d'incertitude de  $0,02 \text{ W/m}^2$  à  $0,09 \text{ W/m}^2$ ) (*degré de confiance faible*) (Myhre et coll., 2013).

La meilleure estimation du forçage radiatif total imputable aux activités humaines est un effet de réchauffement de  $2,3 \text{ W/m}^2$  (plage d'incertitude de 90 % allant de  $1,1 \text{ W/m}^2$  à  $3,3 \text{ W/m}^2$ ) au cours de l'ère industrielle, composé d'une forte composante de forçage positif provenant des modifications des concentrations atmosphériques de GES, qui est partiellement compensée par un forçage négatif (effet de refroidissement) provenant d'aérosols et de modifications survenues dans l'utilisation des sols. Le forçage par le  $\text{CO}_2$  est le plus important contributeur au forçage anthropique au cours de l'ère industrielle.

Ce forçage total provenant des activités humaines peut être comparé au forçage naturel provenant de la fluctuation des éruptions volcaniques et de l'irradiation solaire. Au cours de l'ère industrielle, des éruptions volcaniques irrégulières ont eu de brefs effets de refroidissement sur le climat mondial. La nature épisodique des éruptions volcaniques rend difficile une comparaison avec d'autres agents de forçage sur une échelle de temps d'un siècle. Toutefois, on comprend bien que le forçage volcanique soit négatif (effet de refroidissement du climat) avec le forçage le plus fort survenant sur une période limitée d'environ deux ans après les éruptions (Myhre et coll., 2013; voir la section 2.3.3). Les modifications de l'irradiation solaire au cours de l'ère industrielle ont causé un petit forçage positif de  $0,05 \text{ W/m}^2$  (plage d'incertitude de 90 % allant de  $0,00 \text{ W/m}^2$  à  $0,10 \text{ W/m}^2$ ) (*degré de confiance moyen*). Par conséquent, l'on peut soutenir, avec un *degré de confiance très élevé*, qu'au cours de l'ère industrielle, le forçage naturel ne représente qu'une petite fraction des changements liés au forçage, ce qui équivaut à moins de 10 % des effets du forçage anthropique.

## Résumé de la section

En résumé, comme l'a conclu le GIEC (GIEC, 2013b), le forçage radiatif total est positif et a mené à une prise en charge de l'énergie par le système climatique. La plus grande contribution au forçage radiatif total provient de l'augmentation de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  depuis le début de l'ère industrielle. Ce facteur est la principale cause du réchauffement de la planète et du changement climatique au cours de cette période. Le forçage naturel provenant du changement de l'irradiation solaire et des aérosols volcaniques a apporté uniquement une petite contribution tout au long du siècle dernier, sauf pour de brèves périodes qui ont suivi des éruptions volcaniques.

### 2.3.3: Variabilité climatique naturelle

Même lorsqu'un forçage anthropique fort suscite les changements climatiques (voir la section 2.3.2), il peut être difficile de détecter les signaux du changement climatique dans un contexte d'un système climatique qui est naturellement chaotique – « bruyant ». Ce comportement chaotique est attribuable à la variabilité interne du climat et aux forçages externes naturels, qui peuvent être importants sur de courtes périodes (p. ex. le forçage par des éruptions volcaniques). La variabilité climatique interne, comme El Niño-Oscillation australe (ENSO) (voir l'encadré 2.5), est la variabilité qui survient dans le système climatique, et est indépendante des variations du forçage externe.

## Encadré 2.5: Modes de variabilité climatique

« Modes de variabilité climatique » ce sont des caractéristiques distinctes et robustes de la variabilité du système climatique avec les caractéristiques identifiables, et touchent des régions particulières au cours de certaines périodes. En règle générale, ces caractéristiques alternent ou « oscillent » entre un ensemble de modèles et un autre ensemble. Un exemple courant est le phénomène El Niño-Oscillation australe (ENSO), mais il existe d'autres modes de variabilité qui sont également énoncés dans le présent rapport.

### El Niño-Oscillation australe et le dipôle de l'océan Indien

ENSO est une variation quasi périodique de la température à la surface de la mer et d'autres variables connexes, comme la pression en surface et le vent de surface, d'une durée d'environ trois à cinq ans, et qui est située principalement dans l'est de l'océan Pacifique tropical. ENSO touche bien des régions tropicales et subtropicales, mais influence également les régions des latitudes tempérées des deux hémisphères, y compris le Canada. La phase chaude de l'ENSO est connue sous le nom d'El Niño (eaux chaudes dans l'Est de l'océan Pacifique tropical) et la phase froide est La Niña (eaux froides dans l'Est de l'océan Pacifique tropical). La phase chaude a tendance à être associées à des températures de l'air plus chaudes en hiver et des conditions plus sèches sur une grande partie du Canada. Le contraire est vrai pendant La Niña. Le dipôle de l'océan Indien est lié à l'ENSO; il s'agit d'une variation de la température à la surface de la mer centrée dans l'océan Indien, avec une échelle de temps typique d'environ deux ans.

### Oscillation décennale du Pacifique et oscillation interdécennale du Pacifique

L'oscillation décennale du Pacifique (ODP) est un régime récurrent de variabilité de la température à la surface de la mer à la variabilité centrée dans la latitude tempérée du nord de l'océan Pacifique. L'ODP a varié de façon irrégulière, avec une échelle de temps caractéristique allant d'aussi peu que quelques années à aussi longtemps que plusieurs décennies. Comme c'est le cas pour l'ENSO, la phase chaude (positive) de l'ODP tend à être associée à des températures de l'air plus chaudes en hiver sur une grande partie du Canada (Shabbar et Yu, 2012). Au cours du siècle dernier, ce mode de variabilité a exercé une forte influence sur les températures de l'air et les précipitations à la surface continentale, de la Californie à l'Alaska. L'oscillation interdécennale du Pacifique (OIP) est liée à l'ODP, mais a une plus grande influence géographique (Salinger et coll., 2001)

### Oscillation arctique et oscillation nord-atlantique

L'oscillation arctique (AO), qu'on appelle parfois le mode annulaire boréal, est le modèle dominant de variabilité de la pression au niveau de la mer et de la pression atmosphérique au nord du 20° de latitude nord environ. Si ces pressions sont élevées au-dessus de l'Arctique, elles sont faibles aux latitudes tempérées, l'inverse étant également vrai. L'OA varie au fil du temps, sans aucune périodicité particulière. La phase positive de l'OA a tendance à être associée en hiver au réchauffement de la température de l'air au-dessus de l'Ouest canadien, et des températures plus froides dans le Nord et l'Est. L'oscillation nord-atlantique (ONA) est liée à l'OA, mais est centrée sur l'océan l'Atlantique Nord, plutôt que sur l'ensemble de l'hémisphère nord. L'ONA a une forte influence sur la force et la direction des vents provenant de l'ouest et sur l'emplacement du passage des tempêtes au-dessus de l'océan l'Atlantique Nord. La phase positive de l'ONA est également associée à des températures hivernales chaudes sur une grande partie de l'Ouest canadien et des températures hivernales plus froides au-dessus de l'Est du Canada.

## Oscillation atlantique multidécennale

L'oscillation atlantique multidécennale (OAM) est un modèle récurrent de la température à la surface de la mer de l'océan Atlantique Nord (au nord de l'Équateur et au sud du 80° de latitude nord), avec une échelle de temps caractéristique de 60 à 80 ans. L'OAM a la réputation d'influer sur l'activité des ouragans ainsi que sur la configuration et l'intensité des pluies, dans l'océan Atlantique Nord.

La température moyenne à la surface du globe (TMSG), telle que calculée par une tendance linéaire, a considérablement augmenté depuis les années 1880, surtout depuis les années 1950 (voir la section 2.2.1). Toutefois, les changements apportés à la TMSG ont été loin d'être uniformes, avec d'importantes variations entre les années, les décennies et les périodes s'étendant sur plusieurs décennies. Ces fluctuations à court terme s'ajoutent à une tendance sous-jacente forcée à l'externe (voir la figure 2.9) (Morice et coll., 2012; Karl et coll., 2015; Hansen et coll., 2010)).

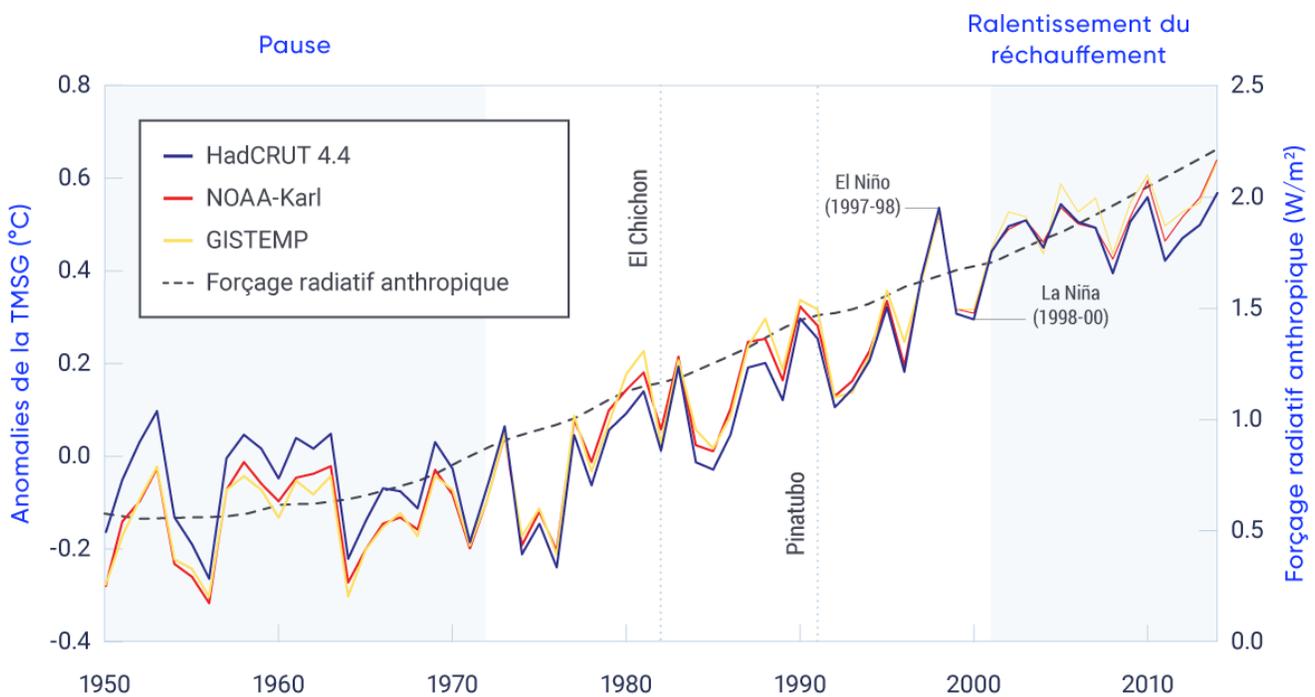


Figure 2.9: Température annuelle moyenne à la surface du globe et forçage radiatif anthropique

Différences de la température annuelle moyenne à la surface du globe (en comparaison de la période allant de 1961 à 1990) à l'égard de trois ensembles de données. Le forçage radiatif lié aux activités humaines est représenté par la ligne pointillée noire.

SOURCE: ADAPTÉ DE FYFE ET COLL., 2016.

Pour analyser les causes des fluctuations à court terme de la TMSG, nous devons d'abord nous assurer que la variabilité observée est réelle et non un artefact, une erreur introduite par la manière dont les données ont été recueillies et analysées. Les séries chronologiques de la TMSG à long terme ont été produites par un petit nombre d'équipes scientifiques qui ont utilisé les données recueillies partout dans le monde. Les valeurs sont déclarées comme étant une anomalie : un écart de la moyenne par rapport à une période de référence (de 1961 à 1990 pour la figure 2.9). Les différences entre les estimations sont attribuables principalement aux différents choix qui ont été faits dans le traitement des observations brutes sous-jacentes. Par exemple, une estimation (HadCRUT4.4) est une moyenne uniquement pour les cellules de la grille où existent des observations, tandis que les autres estimations (NOAA-Karl et GISTEMP) utilisent le remplissage; s'il manque des observations pour certains endroits, elles sont évaluées en fonction de valeurs pour les endroits voisins. Ces estimations de la TMSG et d'autres données sont régulièrement mises à jour au fur et à mesure que les erreurs sont déterminées et rajustées (voir l'encadré 4.1). Il est essentiel de corriger les ensembles de données à long terme et de les mettre à jour en tenant compte de nouvelles observations au fur et à mesure qu'elles deviennent disponibles afin de faire le suivi du changement mondial d'une année à l'autre, d'une décennie à l'autre et d'un siècle à l'autre.

Certaines des variations au fil du temps indiquées à la figure 2.9 sont associées à l'ENSO, la vérification interne assez périodique de la température à la surface de la mer dans l'est de l'océan Pacifique tropical, et touchent une grande partie des régions tropicales, subtropicales et certaines régions à l'extérieur des tropiques, y compris le Canada (encadré 2.6). La phase de réchauffement est appelée El Niño et la phase de refroidissement, La Niña. Les événements de l'ENSO peuvent être assez puissants pour être enregistrés comme un signal important de la TMSG. En 1997–1998, El Niño a été considéré comme l'un des plus puissants El Niño dans l'histoire, et a entraîné des sécheresses de grande étendue, des inondations et d'autres catastrophes naturelles partout dans le monde (Trenberth, 2002). Le courant a pris fin brusquement au milieu de 1998 et a été suivi par un courant La Niña modéré à fort, qui a duré jusqu'à la fin de l'an 2000 (Shabbar et Yu, 2009).

Certaines des autres variations montrées à la figure 2.9 sont associées à des agents de forçage naturels externes, comme les grandes éruptions volcaniques. En 1991, l'éruption du mont Pinatubo, aux Philippines, a été la deuxième plus grande éruption terrestre du XX<sup>e</sup> siècle. Elle a rejeté une importante quantité de matières particulaires dans la stratosphère et a produit une couche de brume sèche d'acide sulfurique sur la Terre. La TMSG a considérablement diminué de 1991 à 1993 (McCormick et coll., 1995). De même, l'éruption de 1982 du volcan El Chichón, la plus grande éruption volcanique de l'histoire moderne du Mexique, a rejeté une grande quantité d'aérosols de sulfate dans la stratosphère (Robock et Matson, 1983). Le refroidissement causé par l'éruption du volcan El Chichón sur la TMSG, de 1982 à 1984, a été en partie compensé par le réchauffement de la planète associée à un très fort El Niño au cours de cette période (Robock, 2013).

Les variations de la TMSG survenant naturellement, qu'elles soient générées à l'interne ou forcées à l'externe, devraient être perçues dans le contexte du forçage radiatif de la moyenne mondiale causé par les activités humaines (Fyfe et coll., 2016). Les forçages radiatifs combinés provenant des activités humaines ont augmenté au fil du temps (voir la figure 2.9) (Meinshausen et coll., 2011). Les périodes à la figure 2.9 qui indiquent que la pause (hiatus) et le ralentissement du réchauffement correspondent à des moments où le principal mode de variabilité décennale interne dans la région du Pacifique, l'oscillation interdécennale du Pacifique (OIP), était au négatif (phase froide). En outre, au cours de la période de la pause, le forçage radiatif a augmenté relativement lentement en raison du refroidissement lié à l'augmentation des aérosols troposphériques, ainsi que les aérosols stratosphériques provenant de l'éruption du mont Agung en 1963 (p. ex. Fyfe et coll., 2016). Dans l'intervalle, l'OIP était dans sa phase positive (chaude). Une phase donnée de l'OIP, chaude ou froide, dure généralement entre 20 et 30 ans, ce qui est beaucoup plus long que l'échelle de temps associée à l'ENSO. Selon des modèles informatiques récents (Meehl et coll., 2013; Kosaka et Xie, 2013; Angleterre et coll., 2014) et des études fondées sur des observations (Steinman et coll., 2015; Dai et coll., 2015), l'OIP joue un rôle important dans l'évolution de la TMSG au fil du temps.

Enfin, le ralentissement du taux de croissance de la TMSG observé au début des années 2000 a fait l'objet de beaucoup de débats (Karl et coll., 2015; Lewandowsky et coll., 2015; Rajaratnam et coll., 2015). Les observations indiquent que le taux de réchauffement moyen global de la surface de 2001 à 2015 était considérablement inférieur au taux au cours des 30 années précédentes (Fyfe et coll., 2016). On comprend maintenant que la variabilité interne et le forçage externe ont contribué au ralentissement du réchauffement (Flato et coll., 2013; Fyfe et coll., 2016; Santer et coll., 2017). La contribution provenant du forçage externe a été attribuée à : 1) une succession d'éruptions volcaniques modérées au début du XXI<sup>e</sup> siècle (Solomon et coll., 2011; Vernier, 2011; Fyfe et coll., 2013; Santer et coll., 2014; Ridley et coll., 2014; Santer et coll., 2015); 2) une activité solaire anormalement faible et longue au cours du dernier cycle solaire (Kopp et Lean, 2011; Schmidt et coll., 2014); 3) le fardeau atmosphérique accru lié aux aérosols sulfatés provenant de l'activité humaine (Smith et coll., 2016); et 4) une diminution de la vapeur d'eau stratosphérique (Solomon et coll., 2010). Au cours des dernières années, il y a eu un réchauffement important de la TMSG (p. ex. Hu et Fedorov, 2017) et l'ENSO a été exceptionnellement fort en 2015-2016, ce qui laisse croire que le ralentissement du réchauffement est maintenant terminé.

## Résumé de la section

En résumé, de multiples séries chronologiques indépendantes de TMSG historique, la simulation des modèles de variabilité et du changement historique, les projections de changements futurs et la compréhension physique de la variabilité climatique naturelle prises ensemble indiquent que, sur des décennies, les taux de réchauffement peuvent varier et que des périodes de réchauffement réduit ou amélioré sont prévues. Selon la conclusion du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, la variabilité interne et le forçage externe ont contribué au ralentissement du réchauffement, et la recherche subséquente confirme cette conclusion et permet de mieux comprendre la contribution des divers facteurs.

### 2.3.4: Détection et attribution des changements observés

L'établissement des causes des changements climatiques observés fait appel à la « détection » et à l'« attribution ». Plus précisément, la « détection » signifie de démontrer qu'un changement observé est incompatible avec la variabilité climatique interne; en effet, la tâche consiste à détecter un « bruit » de la variabilité climatique de fonds. L'« attribution » signifie de déterminer les causes d'un changement observé en ce qui concerne différents forçages (Bindoff et coll., 2013). Le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC comprenait un chapitre (Bindoff et coll., 2013) où l'on évalue la preuve de l'attribution des changements mondiaux et régionaux pour une gamme de variables à l'augmentation des émissions de GES et d'autres forçages. Il est important de comprendre les causes des changements climatiques à l'échelle mondiale afin de comprendre les causes des changements climatiques régionaux abordées aux chapitres 4 à 7 du présent rapport. Dans la présente sous-section, nous résumons les constatations pertinentes de l'évaluation faite dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC et les plus récentes constatations sur l'attribution à l'échelle mondiale. La science relativement nouvelle de l'attribution des événements individuels, par opposition aux changements à long terme, est abordée au chapitre 4, section 4.4.

Les études sur la détection et l'attribution comparent les changements climatiques observés aux simulations de différents types d'expériences avec des modèles climatiques : 1) des simulations de la réponse aux forçages externes d'intérêts; et 2) des simulations sans aucune variation du forçage externe qui montre les effets de la variabilité climatique interne. La confiance

en ces analyses s'accroît en utilisant des simulations provenant de multiples modèles climatiques conçus dans des centres partout dans le monde, et en validant la variabilité interne simulée au moyen de la comparaison avec des observations. Si un changement observé est incompatible avec la variabilité interne simulée, alors une réponse au forçage externe est détectée. Si le changement observé est compatible avec les simulations de modèle, y compris avec un forçage particulier, comme les GES, et est incompatible avec les simulations qui les omettent, alors le changement observé est attribuable, en partie, à ce forçage. Comme plus d'un forçage dicte les tendances du climat, un changement observé n'est généralement pas entièrement attribuable à des variations d'un forçage. Les sections qui suivent résument l'attribution des changements observés dans chaque composante du système climatique.

## Atmosphère et surface

Dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, on a évalué les contributions des GES, d'autres forçages anthropogènes (surtout des aérosols) et le forçage naturel à la tendance observée de la TMSG, qui a augmenté d'environ 0,6 °C, de 1951 à 2010, selon plusieurs études qui avaient évalué ces tendances quantitativement au moyen des méthodes de détection et d'attribution. La tendance attribuable aux forçages combinés provenant des activités humaines (surtout des changements des GES et des aérosols) se situe probablement entre 0,6 °C et 0,8 °C (voir la figure 2.10) et constitue **extrêmement probablement** plus de la moitié des augmentations observées (Bindoff et coll., 2013). À noter que, comme prévu, dans son Cinquième Rapport d'évaluation, le GIEC a attribué une probabilité inférieure à l'intervalle de confiance plus étroit (de 0,6 °C à 0,8 °C) et une probabilité supérieure à un intervalle plus large (supérieur à la moitié du réchauffement observé). Toutefois, lorsque la réponse de la TMSG aux forçages est répartie en contributions du forçage de GES et du forçage d'aérosols, les incertitudes sont plus importantes en raison de plusieurs facteurs : les grandes incertitudes liées au forçage d'aérosols, les différences au niveau des réponses simulées à ces forçages entre les modèles et les difficultés de séparer la réponse aux augmentations de GES de la réponse aux changements des aérosols. Néanmoins, plus de la moitié de la hausse observée de la TMSG était **très probablement** causée par l'augmentation observée d'origine humaine des concentrations de GES. L'effet combiné des aérosols provenant des éruptions volcaniques et des variations de l'irradiation solaire a uniquement apporté une petite contribution aux tendances observées au cours de cette période (du point de vue statistique, la contribution n'était pas considérablement différente de zéro). De même, la variabilité interne n'a apporté qu'une petite contribution aux tendances au cours de cette période. Le réchauffement a également été observé au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et il était **très improbable** que ce réchauffement ait été causé uniquement par la variabilité interne, mais il reste difficile de quantifier la contribution de la variabilité interne, du forçage anthropique et du forçage naturel à ce réchauffement (Bindoff et coll., 2013).

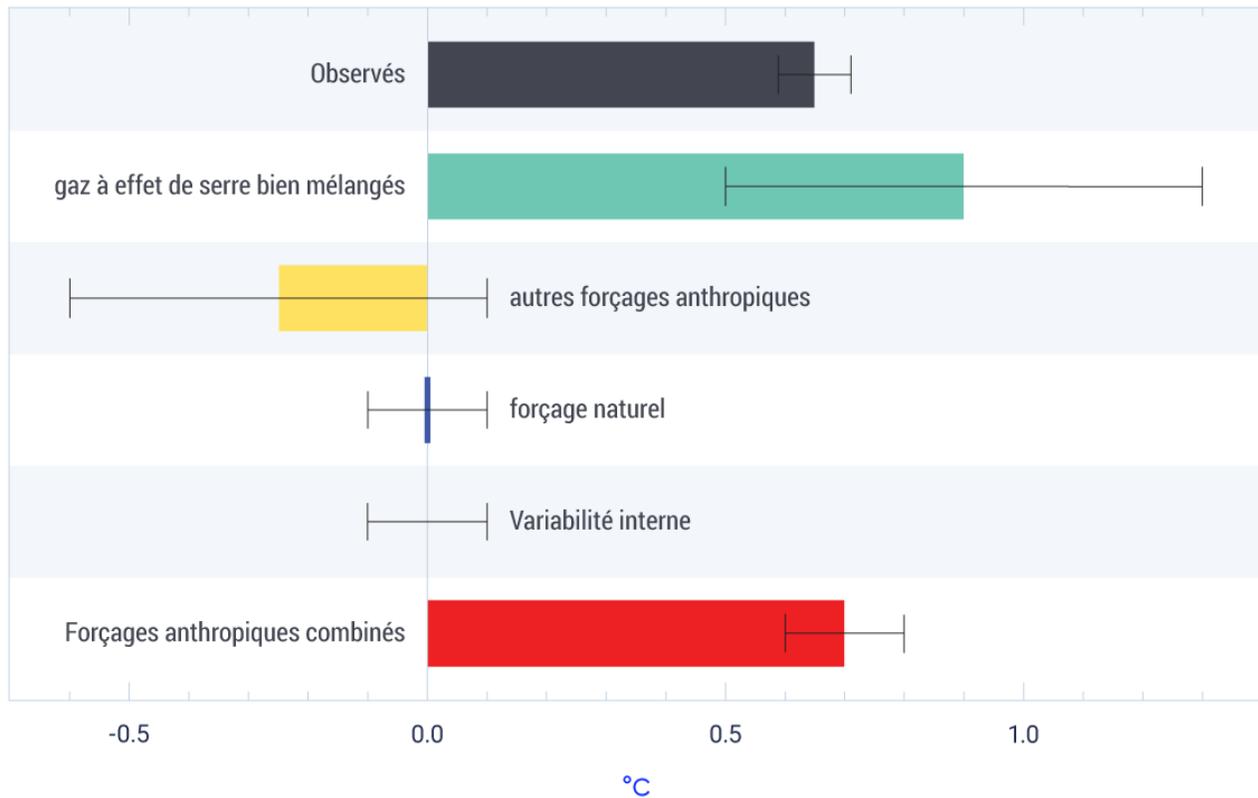


Figure 2.10: Forçages auxquels le réchauffement mondial moyen a été attribué, de 1951 à 2010

Légende de la figure : Dans son Cinquième Rapport d'évaluation, le GIEC a évalué les écarts possibles (lignes horizontales [moustaches]) et leurs points milieux (barres) pour les forçages auxquels le réchauffement mondial moyen au cours de la période de 1951 à 2010 peut être attribué : des gaz à effet de serre bien mélangés, d'autres forçages anthropiques (dominé par les aérosols), forçages anthropiques combinés, forçages naturels et la variabilité interne. La barre noire montre la tendance des températures observées (ensemble de données HadCRUT4) et une plage d'incertitude connexe de 5 % à 95 % (moustaches). Les barres situées à gauche de 0,0 °C indiquent un refroidissement qui en découle; les barres situées à droite indiquent un réchauffement qui en découle.

SOURCE : BINDOFF ET COLL., 2013, FIGURE 10.5.

Depuis la publication du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, des études ont éclairé davantage certains aspects de la détection et de l'attribution. Par exemple, l'influence de l'incertitude dans des observations sur les estimations de la tendance de la TMSG attribuable aux GES a été jugée faible par rapport aux autres sources d'incertitude (Jones et Kennedy, 2017). Une autre étude a révélé qu'il reste des différences considérables parmi les modèles de réactions simulées aux forçages d'origine humaine, en particulier pour le forçage ne provenant pas des GES (Jones et coll., 2016). Toutefois, les conclusions de ces études restent conformes au Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Bindoff et coll., 2013). Même lorsqu'on utilise une nouvelle approche pour la détection et l'attribution (Ribes et coll., 2017), la gamme évaluée de la contribution aux tendances observées du réchauffement d'origine humaine reste conforme à la gamme indiquée dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Bindoff et coll., 2013).

Dans son Cinquième Rapport d'évaluation, le GIEC a également estimé qu'il était probable que les forçages anthropiques d'origine humaine ont contribué au réchauffement de la couche inférieure de l'atmosphère (troposphère) depuis 1961 (Bindoff et coll., 2013). Des recherches entreprises récemment continuent d'appuyer cette évaluation. Une nouvelle étude a révélé que les différences apparentes du taux de réchauffement de la couche inférieure de l'atmosphère entre les modèles climatiques et les observations par satellite depuis 1979 sont inférieures au taux signalé auparavant (Santer et coll., 2017).

On estime, avec un *degré de confiance moyen*, que les activités humaines ont contribué à l'augmentation observée de l'humidité spécifique dans l'atmosphère et aux changements des précipitations terrestres à l'échelle mondiale depuis 1950, y compris une augmentation dans l'hémisphère Nord aux latitudes moyennes et élevées (Bindoff et coll., 2013). De grandes incertitudes dans les observations et les modèles, et de grandes variabilités internes des précipitations, ont exclu un plus haut degré de confiance. Dans les recherches réalisées depuis le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (p. ex. Hegerl et coll., 2015; Polson et coll., 2016), on a examiné les sources d'incertitude plus en détail, mais les conclusions générales restent conformes à celles formulées dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Bindoff et coll., 2013).

## Océan

Plusieurs aspects du changement observé dans les océans à l'échelle mondiale ont été attribués à l'activité humaine. En particulier, il est *très probable* que le forçage anthropique a contribué de manière substantielle au réchauffement des couches supérieures des océans depuis 1970 et à une augmentation de la moyenne globale du niveau de la mer depuis les années 1970 (Bindoff et coll., 2013). Il est *très probable* que les augmentations de CO<sub>2</sub> d'origine humaine ont entraîné l'acidification des eaux de surface de l'océan par l'entremise de l'absorption de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, la diminution du pH de 0,001 4 pour atteindre 0,002 4 par année (voir le chapitre 7, section 7.6.1). Des recherches réalisées récemment continuent d'appuyer l'attribution du réchauffement des océans et de l'élévation du niveau de la mer à l'influence humaine (p. ex. Slangen et coll., 2014; Weller et coll., 2016), et de nouvelles estimations du contenu thermique des couches supérieures des océans montrent une plus grande tendance au réchauffement que celle évaluée dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Durack et coll., 2014).

## Cryosphère

Il est *très probable* que les forçages d'origine anthropique ont contribué à la perte de glace marine dans l'Arctique depuis 1979 (Bindoff et coll., 2013). Cette conclusion était fondée sur des simulations de modèles, qui ont pu reproduire le déclin observé uniquement lorsque l'on exclut les forçages anthropiques. Il y a un *degré de confiance faible* dans la compréhension d'une augmentation observée de l'étendue de la glace marine dans l'Antarctique. Toutefois, étant donné que l'évaluation a été faite en 2013, l'étendue de la glace marine dans l'Antarctique a diminué et, en septembre 2017, elle n'avait été plus basse qu'à une seule autre occasion par le passé (NOAA, 2017). Il est probable que le forçage anthropique a contribué à la fonte de la surface observée de l'Inlandsis du Groenland depuis 1993 et au retrait observé des glaciers depuis les années 1960, mais il y a un *degré de confiance faible* dans l'attribution des causes de la perte de masse de l'Inlandsis de l'Antarctique. Il y avait probablement une contribution de l'activité humaine aux réductions observées dans le manteau neigeux de l'hémisphère nord depuis 1970 (Bindoff et coll., 2013). De nouvelles recherches renforcent la preuve de l'attribution de la diminution de l'étendue de la glace marine dans l'Arctique (p. ex. Kirchmeier-Young et coll., 2017) et dans le manteau neigeux de l'hémisphère Nord (p. ex. Najafi et coll., 2016) à l'influence humaine.



## Extrêmes

À l'échelle mondiale, il est *très probable* que le forçage anthropique a contribué aux changements observés dans la fréquence des extrêmes de température quotidienne depuis 1950, y compris aux augmentations des chaleurs extrêmes et aux réductions des froids extrêmes (Bindoff et coll., 2013). Pour les régions ayant suffisamment d'observations, on peut affirmer avec un *degré de confiance moyen* que le forçage anthropique ait contribué à l'augmentation de l'intensité des épisodes de précipitations abondantes depuis 1950. De nouvelles recherches renforcent la preuve pour l'attribution des changements de température et des précipitations extrêmes à l'influence humaine (Zhang et coll., 2013; Kim et coll., 2016; Fischer et Knutti, 2015; Christidis et Stott, 2016).

## Résumé de la section

En résumé, l'évaluation présentée dans le Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Bindoff et coll., 2013) indiquant qu'il est *extrêmement probable* que les activités humaines sont la principale cause du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle a été appuyée par des éléments de preuve solide provenant de multiples études, et a été appuyée par des études supplémentaires depuis l'année 2013. Des éléments de preuve relatifs à la détection de l'influence humaine sur d'autres variables climatiques dans l'atmosphère, les océans et la cryosphère étaient très forts au moment de la publication du Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (Bindoff et coll., 2013), et l'accumulation d'éléments de preuve s'est poursuivie depuis.

## Références

Académie nationale des sciences et Société royale. *Climate Change : Evidence and Causes*, The National Academies Press, Washington, District de Columbia, États-Unis, 2014.

Arrhenius, S. « On the influence of carbonic acid in the air on the temperature upon the temperature of the ground » *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 4, 1896, pp. 237–276.

Bindoff, N.L., Stott, P.A., AchutaRao, K.M., Allen, M.R., Gillett, N., Gutzler, D., Hansingo, K., Hegerl, G., Hu, Y., Jain, S., Mokhov, I.I., Overland, J., Perlwitz, J., Sebbari, R. et Zhang, X. « Détection et attribution des changements climatiques : de l'échelle mondiale à régionale », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 867–952.

Blunden, J. et Arndt, D.S. (éd.). « State of the Climate in 2015 », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, 2016, p. S1–S275.

Blunden, J. et Arndt, D.S. (éd.). « State of the Climate in 2016 », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, 2017, p. Si–S277.

Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M. C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G. et Zender, C.S. « Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment », *Journal of Geophysical Research : Atmosphere*, vol. 118, 2013, pp. 5380–5552.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S.K., Sherwood, S., Stevens, B. et Zhang, X.Y. « Nuages et aérosols », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 571–658.

Chen, J.M., Chen, B., Higuchi, K., Liu, J. Chan, D., Worthy, D., Tans, P. et Blacks, A. « Boreal ecosystems sequestered more carbon in warmer years », *Geophysical Research Letters*, vol. 33, 2006.

Christidis, N. et Stott, P. « Attribution analyses of temperature extremes using a set of 16 indices », *Weather and Climate Extremes*, vol. 14, 2016, pp. 24–35. [doi:10.1016/j.wace.2016.10.003](https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.003)

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R.B., Piao, S. et Thornton, P. « Cycle du carbone et autres cycles biogéochimiques », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments*

*scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 465–570.

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N. et Winther, J.-G. « Introduction », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 119–158.

Dai, A., Fyfe, J.C., Xie, S.-P. et Dai, X. « Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability », *Nature Climate Change*, vol. 5, 2015, pp. 555–559.

Durack, P.J., Gleckler, P.J., Landerer, F.W. et Taylor, K.E. « Quantifying underestimates of long-term upper-ocean warming », *Nature Climate Change*, vol. 4, 2014, pp. 999–1005.

England, M.H., McGregor, S., Spence, P., Meehl, G.A., Timmermann, A., Cai, W., Sen Gupta, A., McPhaden, M.J., Purich, A. et Santoso, A. « Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus », *Nature Climate Change*, vol. 4, 2014, pp. 222–227.

Fahey, D.W., Doherty, S.J., Hibbard, K.A., Romanou, A. et Taylor, P.C. « Physical drivers of climate change », dans *Climate Science Special Report : Fourth National Climate Assessment*, Vol. 1, D.J. Wuebbles, D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, et T.K. Maycock (éd), U.S. Global Change Research Program, Washington, District de Colombie, États-Unis, 2017, pp. 73–113.

Fischer, E.M. et Knutti, R. « Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes », *Nature Climate Change*, vol. 5, 2015, pp. 560–564.

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. et Rummukainen, M. « Évaluation des modèles climatiques », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 741–866.

Fourier, J.-B. J. *Mémoires sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, 1827, <[http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fourier/Fourier\\_pdf/Mem1827\\_p569\\_604.pdf](http://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fourier/Fourier_pdf/Mem1827_p569_604.pdf)>

Fyfe, J.C., Meehl, G.A., England, M.H., Mann, M.E., Santer, B.D., Flato, G.M., Hawkins, E., Gillett, N.P., Xie, S.-P., Kosaka, Y. et Swart, N.C. « Making sense of the early-2000s global warming slowdown », *Nature Climate Change*, vol. 6, 2016, pp. 224–228.

Fyfe, J.C., von Salzen, K., Cole, J.N.S., Gillett, N.P. et Vernier, J.-P. « Surface

response to stratospheric aerosol changes in a coupled atmosphere–ocean model », *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 2013, pp. 584–588.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Climate Change : The IPCC Scientific Assessment (1990)*, Contribution du Groupe de travail I au premier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.T. Houghton, G.J. Jenkins et J.J. Ephraums (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, New York, New York, États-Unis et Melbourne, Australie, 1990, 410 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Climate Change 1995 : The Science of Climate Change*, Contribution du Groupe de travail I au deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, et K. Maskell (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 1996.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*, Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2001, 881 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, 996 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Rapport Spécial sur la gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique*, Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C.B. Field, 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, et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2012, 582 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013a, 1535 p.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013b, pp. 1–30.

- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Annexe III : Glossaire », dans *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Planton, S., T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013c, pp. 1–30.
- Hadden, D. et Grelle, D. « Changing temperature response of respiration turns boreal forest from carbon sink into carbon source », *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 223, 2016, pp. 30–38.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. et Lo, K. « Global surface temperature change », *Review of Geophysics*, vol. 48, 2010.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M. et Zhai, P.M. « Observations : atmosphère et Surface », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 159–254.
- Hawkins, E., Ortega, P., Suckling, E., Schurer, A., Hergel, G., Jones, P., Joshi, M., Osborn, T.J., Masson-Delmotte, V., Mignot, J., Thorne, P. et Van Oldenborgh, G.J. « Estimating changes in global temperature since the pre-industrial period », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, 2017, pp. 1841–1856.
- Hegerl, G.C., Black, E., Allan, R.P., Ingram, W.J., Polson, D., Trenberth, K.E., Chadwick, R.S., Arkin, P.A., Sarojini, B.B., Becker, A., Dai, A., Durack, P.J., Easterling, D., Fowler, H.J., Kendon, E.J., Huffman, G.J., Liu, C., Marsh, R., New, M., Osborn, T.J., Skliris, N., Stott, P.A., Vidale, P., Wijffels, S.E., Wilcox, L.J., Willett, K.M., et Zhang, X. « Challenges in quantifying changes in the global water cycle », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 96, 2015, pp. 1097–1115.
- Hu, A. et Fedorov, A.V. « The extreme El Niño of 2015–2016 and the end of global warming hiatus », *Geophysical Research Letters*, vol. 44, 2017, pp. 3816–3824.
- Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba R. et Zhang, D. « Palaeoclimate », dans *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, 996 p.
- Jones, G.S. et Kennedy, J.J. « Sensitivity of attribution of anthropogenic near-surface warming to observational uncertainty », *Journal of Climate*, vol. 30, 2017, pp. 4677–4691.
- Jones, G.S., Stott, P.A. et Mitchell, J.F. « Uncertainties in the attribution of greenhouse gas warming and implications for climate prediction »,

*Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 121, 2016, pp. 6969–6992.

Karl, T.R., Arguez, A., Huang, B., Lawrimore, J.H., McMahon, J.R., Menne, M.J., Peterson, T.C., Vose, R.S. et Zhang, H.-M. « Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus », *Science*, vol. 348, 2015, pp. 1469–1472.

Kim, Y.H., Min, S.K., Zhang, X., Zwiers, F., Alexander, L.V., Donat, M.G. et Tung, Y.S. « Attribution of extreme temperature changes during 1951–2010 », *Climate Dynamics*, vol. 46, 2016, pp. 1769–1782.

Kirchmeier-Young, M.C., Zwiers, F.W. et Gillett, N.P. « Attribution of extreme events in Arctic Sea ice extent », *Journal of Climate*, vol. 30, 2017, pp. 553–571.

Kopp, G. et Lean, J.L. « A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, 2011.

Kosaka, Y. et Xie, S.-P. « Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling », *Nature*, vol. 501, 2013, pp. 403–407.

Kurz, W.A., Shaw, C.H., Boisvenue, C., Stinson, G., Metsaranta, J., Leckie, D., Dyk, A., Smyth, C., et Neilson, E.T. « Carbon in Canada's boreal forest – a synthesis », *Environmental Reviews*, vol. 21, 2013, pp. 260–292.

Lacis, A., Schmidt, G., Rind, D. et Ruedy, R. « Atmospheric CO<sub>2</sub>: principal control knob governing Earth's temperature », *Science*, vol. 330, 2010, pp. 356–359.

Le Quéré, C.L., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Sitch, S., Korsbakken, J.I., Peters, G.P., Manning, A.C., Boden, T.A., Tans, P.P., Houghton, R.A., Keeling, R.F., Alin, S., Andrews, O.D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L.P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S.C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Klein Goldewijk, K., Jain, A.K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J.R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P.M.S., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.-I., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A.M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, B., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B.D., Sutton, A.J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I.T., van der Werf, G.R., Viovy, N., Walker, A.P., Wiltshire, A.J. et Zaehle, S. « Global carbon budget 2016 », *Earth System Science Data*, vol. 8, 2016, pp. 605–649.

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T. et Prather, M. « Historical Overview of Climate Change », dans *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, Contribution du Groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007, pp. 93–127.

Lewandowsky, S., Risbey, J.S. et Oreskes, N. « On the definition and identifiability of the alleged "hiatus" in global warming », *Scientific Reports*, vol. 5, 2015.

Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J.F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish,

T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X. et Timmermann, A. (2013) : « Information provenant des archives Paleoclimatiques », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 383–464.

McCormick, L.M.P, Thomason, W. et Trepte, C.R. « Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption », *Nature*, vol. 373, 1995, pp. 399–404.

Meehl, G.A., Hu, A., Arblaster, J.M., Fasullo, J. et Trenberth, K.E. « Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation », *Journal of Climate*, vol. 26, 2013, pp. 7298–7301.

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J-F., Matsumoto K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M. et van Vuuren, D.P.P. « The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 », *Climatic Change*, vol. 109, 2011, pp. 213–241.

Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A. et Jones, P.D. « Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset », *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 117, 2012.

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, D., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T. et Zhang, H. « Forçage radiatif anthropique et naturel », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 659–740.

Najafi, M.R., Zwiers, F.W. et Gillett, N.P. « Attribution of the spring snow cover extent decline in the Northern Hemisphere, Eurasia and North America to anthropogenic influence », *Climatic Change*, vol. 136, 2016, pp. 571–586.

NOAA (Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique). *State of the Climate: Global Snow and Ice for September 2017*, 2017.

OMM (Organisation météorologique mondiale) « Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre : Bilan des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, d'après les observations effectuées à l'échelle du globe en 2015 », OMM, n° 12, 2016. < [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/ghg-bulletin\\_12\\_fr.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/ghg-bulletin_12_fr.pdf) >

OMM (Organisation météorologique mondiale) « Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2016 », OMM, n° 1189, 2017, < [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=19847#.W8DFXXnrvcv](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19847#.W8DFXXnrvcv) >.

OMM (Organisation météorologique mondiale) « Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2017 », OMM, n° 1212, 2018, < [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=20221#.W8DEZHnrvcv](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=20221#.W8DEZHnrvcv) >

Overland, J., Walsh, J. et Kattsov, V. « Trends et Feedbacks », dans *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway, 2017, pp. 9–24.

Perovich, D.K., Nghiem, S.V., Markus, T. et Schweiger, A. « Seasonal evolution and interannual variability of the local solar energy absorbed by the Arctic sea ice-ocean system », *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, 2007.

Perovich, D.K., Roesler, C.S. et Pegau, W.S. « Variability in Arctic sea ice optical properties », *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, 1998, pp. 1193–1208.

Pithan, F. et Mauritsen, T. « Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models », *Nature Geoscience*, vol. 7, 2017, pp. 181–184.

Polson, D., Hegerl, G.C. et Solomon, S. « Precipitation sensitivity to warming estimated from long island records », *Environmental Research Letters*, vol. 11, 2016.

Rajaratnam, B., Romano, J., Tsiang, M. et Diffenbaugh, N.S. « Debunking the climate hiatus », *Climatic Change*, vol. 133, 2015, pp. 129–140.

Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S., Johnson, G.C., Josey, S.A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemmich, D., Talley, L.D. et Wang, F. « Observations : Océan », dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis 2013, pp. 255–316.

Ribes, A., Zwiers, F.W., Azaïs, J.M. et Naveau, P. « A new statistical approach to climate change detection and attribution », *Climate Dynamics*, vol. 48, 2017, pp. 367–386.

Ridley, D.A., Solomon, S., Barnes, J. E, Burlakov, V.D., Deshler, T., Dolgii, S.I., Herber, A.B., Nagai, T., Neely III, R.R., Nevzorov, A.V., Ritter, C., Sakai, T., Santer, B.D., Sato, M., Schmidt, A., Uchino, O. et Vernier, J.P. « Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change », *Geophysical Research Letters*, vol. 41, 2014, pp. 7763–7769.

Robock, A. « Climate model simulations of the effects of the El Chichón eruption », *Geofísica Internacional*, vol. 23, 2013, pp. 403–414.

Robock, A. et Matson, M. « Circumglobal transport of the El Chichón volcanic dust cloud », *Science*, vol. 221, 1983, pp. 195–197.

Salinger, M.J., Renwick, J.A. et Mullan, A.B. « Interdecadal Pacific Oscillation and South Pacific Climate », *International Journal of Climatology*, vol. 21, 2001, pp. 1705–1721.

Santer, B.D., Fyfe, J.C., Pallotta, G., Flato, G.M., Meehl, G.A., England, M.H., Hawkins, E., Mann, M.E., Painter, J.F., Bonfils, C. et Cvijanovic, I. « Causes of differences in model and satellite tropospheric warming rates », *Nature Geoscience*, vol. 10, 2017, pp. 478–485.

Santer, B.D., Solomon, S., Bonfils, C., Zelinka, M.D., Painter, J.F., Beltran,

F., Fyfe, J.C., Johannesson, G., Mears, C., Ridley, D.A., Vernier, J.-P. et Wentz, F.J. « Volcanic contribution to decadal changes in tropospheric temperature », *Nature Geoscience*, vol. 7, 2014, pp. 185–189.

Santer, B.D., Solomon, S., Bonfils, C., Zelinka, M.D., Painter, J.F., Beltran, F., Fyfe, J.C., Johannesson, G., Mears, C., Ridley, D.A., Vernier, J.-P. et Wentz, F.J. « Observed multivariable signals of late 20th and early 21st century volcanic activity », *Geophysical Research Letters*, vol. 42, 2015, pp. 500–509.

Saunio, M., Bousquet, P., Poulter, B., Peregón, A., Ciais, P., Canadell, J.G., Dlugokencky, E.J., Etiope, G., Bastviken, D., Houweling, S., Janssens-Maenhout, G., Tubiello, F.N., Castaldi, S., Jackson, R.B., Alexe, M., Arora, V.K., Beerling, D.J., Bergamaschi, P., Blake, D.R., Brailsford, G., Brovkin, V., Bruhwiler, L., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Frankenberg, C., Gedney, N., Höglund-Isaksson, L., Ishizawa, M., Ito, A., Joos, F., Kim, H.-S., Kleinen, T., Krummel, P., Lamarque, J.-F., Langenfelds, R., Locatelli, R., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K.C., Marshall, J., Melton, J.R., Morino, I., Naik, V., O'Doherty, S., Parmentier, F.-J.W., Patra, P.K., Peng, C., Peng S., Peters, G.P., Pisoni, I., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Riley, W.J., Saito, M., Santini, M., Schroeder, R., Simpson, I.J., Spahni, R., Steele, P., Takizawa, A., Thornton, B.F., Tian, H., Tohjima, Y., Viovy, N., Voulgarakis, A., van Weele, M., van der Werf, G.R., Weiss, R., Wiedinmyer, C., Wilton, D.J., Wiltshire, A., Worthy, D., Wunch, D., Xu, X., Yoshida, Y., Zhang, B., Zhang, Z. et Zhu, Q. « The global methane budget 2000–2012 », *Earth System Science Data*, vol. 8, 2016, pp. 697–751.

Schmidt, G.A., Shindell, D.T. et Tsigaridis, K. « Reconciling warming trends », *Nature Geoscience*, vol. 7, 2014, pp. 1–3.

Serreze, M. et Barry, R.G. « Processes and impacts of Arctic Amplification: A research synthesis », *Global Planetary Change*, vol. 77, 2011, pp. 85–96.

Shabbar, A. et Yu, B. « The 1998–2000 La Niña in the context of historically strong La Niña events », *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 114, 2009.

Shabbar, A., et Yu, B. « Intraseasonal Canadian winter temperature responses to interannual and interdecadal Pacific SST modulations », *Atmosphere–Ocean*, vol. 50, 2012, pp. 109–121.

Slangen, A., Church, J.A., Zhang, X. et Monselesan, D. « Detection and attribution of global mean thermohaline sea level change », *Geophysical Research Letters*, vol. 41, 2014, pp. 5951–5959.

Smith, D.M., Booth, B.B.B., Dunstone, N.J., Eade, R., Hermanson, L., Jones, G.S., Scaife, A.A., Sheen, K.L. et Thompson, V. « Role of volcanic and anthropogenic aerosols in the recent global surface warming slowdown », *Nature Climate Change*, vol. 6, 2016, pp. 936–940.

Solomon, S., Daniel, J.S., Neely III, R.R., Vernier J.-P., Dutton, E.G., et Thomason, L.W. « The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change », *Science*, vol. 333, 2011, pp. 866–870.

Solomon, S., Rosenlof, K.H., Portmann, R.W., Daniel, J.S., Davis, S.M., Sanford, T.J. et Plattner, G.-K. « Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming », *Science*, vol. 327, 2010, pp. 1219–1223.

Steffen, W., Crutzen, P.J. et McNeill, J.R. « The Anthropocene: Are Humans



Now Overwhelming the Great Forces of Nature? », *Ambio*, vol. 36, 2007, pp. 614–621.

Steinman, B.A., Mann, M.E. et Miller, S.K. « Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures », *Science*, vol. 347, 2015, pp. 988–991.

Trenberth, K.E. « Evolution of El Niño–Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures », *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, 2002.

Tyndall, J. « On the transmission of heat of different qualities through gases of different kinds »,

*Proceedings of the Royal Institution*, vol. 3, 1859, pp. 155–158; citer dans Hulme, M. « On the origin of 'the greenhouse effect': John Tyndall's 1859 interrogation of nature », *Weather*, Magazine of the Royal Meteorological Society, vol. 64, 2009, pp. 121–123.

USGCRP (United States Global Change Research Program). « Climate Science Special Report : Fourth National Climate Assessment », vol. 1, D.J. Wuebbles, D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (éd), U.S. Global Change Research Program, Washington, District de Columbia, États-Unis, 2017, 470 p.

Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K. et Zhang, T. (2013) : « Observations : Cryosphère » dans *Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques*, Contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (éd), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2013, pp. 317–382.

Vernier, J.-P. « Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric aerosol layer during the last decade », *Geophysical Research Letters*, vol. 38, 2011.

Weller, E., Min, S.K., Palmer, M. D., Lee, D., Yim, B. Y. et Yeh, S.W. « Multi-model attribution of upper-ocean temperature changes using an isothermal approach », *Scientific reports*, vol. 6, 2016.

Zhang, X., Wan, H., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C. et Min, S.K. « Attributing intensification of precipitation extremes to human influence », *Geophysical Research Letters*, vol. 40, 2013, pp. 5252–5257.

