

CONCOURS INTERNE
POUR LE RECRUTEMENT D'INGENIEURS D'ETUDES ET DE FABRICATIONS
DU MINISTERE DE LA DEFENSE, AU TITRE DE L'ANNEE 2008

Date de l'épreuve : 17 juin 2008 à 14h00

Epreuve écrite :

Analyse d'un texte d'ordre technique permettant au jury de juger les qualités d'expression, de logique et de synthèse du candidat.

Durée : 4 heures - coefficient : 2.

AVERTISSEMENTS :

Avant de commencer à composer, vérifiez que *le sujet* relatif au "Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques", qui vous a été remis comporte **18 pages** (y compris cette page de garde) le cas échéant, signalez aux surveillants toute anomalie.

La qualité de la rédaction (orthographe, grammaire, syntaxe et concision) et la présentation sont également évaluées.

L'épreuve est notée sur 20 points.

Toute note inférieure à 5 sur 20 avant application du coefficient est éliminatoire.

Aucune documentation n'est autorisée.

Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques

Résumé à l'intention des décideurs

Rapport du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Basé sur un projet élaboré par :

Daniel L. Albritton, Myles R. Allen, Alfons P. M. Baede, John A. Church, Ulrich Cubasch, Dai Xiaosu, Ding Yihui, Dieter H. Ehhalt, Christopher K. Folland, Filippo Giorgi, Jonathan M. Gregory, David J. Griggs, Jim M. Haywood, Bruce Hewitson, John T. Houghton, Joanna I. House, Michael Hulme, Ivar Isaksen, Victor J. Jaramillo, Achuthan Jayaraman, Catherine A. Johnson, Fortunat Joos, Sylvie Joussaume, Thomas Karl, David J. Karoly, Haroon S. Khesghi, Corrine Le Quéré, Kathy Maskell, Luis J. Mata, Bryant J. McAvaney, Mack McFarland, Linda O. Mearns, Gerald A. Meehl, L. Gylvan Meira-Filho, Valentin P. Meleshko, John F. B. Mitchell, Berrien Moore, Richard K. Mugara, Maria Noguera, Buruhani S. Nyenzi, Michael Oppenheimer, Joyce E. Penner, Steven Pollonais, Michael Prather, I. Colin Prentice, Venkatchala Rameswamy, Armando Ramirez-Rojas, Sarah C. B. Raper, M. Jim Salinger, Robert J. Scholes, Susan Solomon, Thomas F. Stocker, John M. R. Stone, Ronald J. Stoufer, Kevin E. Trenberth, Ming-Xing Wang, Robert T. Watson, Kok S. Yap, John Zillman

avec des contributions de nombreux auteurs et réviseurs.

1. Introduction

Le Troisième Rapport d'évaluation du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'inspire des évaluations précédentes, qu'il développe, et intègre les nouveaux résultats des cinq dernières années de recherche sur les changements climatiques¹. Plusieurs centaines de scientifiques² de nombreux pays ont participé à son élaboration et à sa révision.

Le présent résumé à l'intention des décideurs, approuvé à Shanghai en janvier 2001³ par les gouvernements membres du GIEC, fait le point des connaissances actuelles sur le système climatique, présente des estimations de son évolution future et explique les incertitudes inhérentes à ces estimations. On trouvera davantage de détails dans le rapport principal. Les informations-sources figurant en annexe contiennent des renvois vers les différents chapitres du rapport.

Un nombre croissant d'observations nous donne aujourd'hui une image d'ensemble d'une planète qui se réchauffe et de plusieurs autres changements dans le système climatique.

Depuis la publication du Deuxième Rapport d'évaluation (SAR⁴) l'obtention de données supplémentaires grâce à de nouvelles études du climat actuel et des paléoclimats, l'amélioration de l'analyse des séries de données, une évaluation plus rigoureuse de leur qualité et des comparaisons entre des données de sources différentes nous ont permis de parvenir à une meilleure compréhension des changements climatiques.

Au XX^e siècle, la température moyenne globale à la surface s'est accrue d'environ 0,6 °C.

- La température moyenne globale à la surface (la moyenne de la température de l'air près de la surface du sol et de la température à la surface de la mer) a augmenté depuis 1861. Au XX^e

siècle, cette augmentation a été de 0,6 °C ± 0,2 °C^{5,6} (figure SPM 1a). Cette valeur est supérieure d'environ 0,15 °C à celle estimée par le SAR pour la période qui s'est terminée en 1994, ce qui s'explique à la fois par les températures relativement élevées des années ultérieures (1995 à 2000) et par l'amélioration des méthodes de traitement des données. Ces chiffres tiennent compte de différents ajustements, y compris les effets des îlots de chaleur urbains. Les relevés indiquent que le degré de variabilité a été important; par exemple, l'essentiel du réchauffement survenu au cours du XX^e siècle est concentré sur deux périodes: 1910-1945 et 1976-2000.

- Globalement, il est très probable⁷ que les années 90 aient été la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude depuis que l'on tient des relevés, c'est-à-dire depuis 1861 (voir figure SPM 1a).
- De nouvelles analyses de données indirectes pour l'hémisphère Nord montrent qu'il est probable⁷ que le réchauffement observé au XX^e siècle ait été le plus important des 1000 dernières années. Il est également probable⁷ que dans l'hémisphère Nord, les années 90 aient été la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude (figure SPM 1b). Les données disponibles étant moins nombreuses en ce qui concerne les moyennes annuelles des températures il y a plus de 1000 ans, on ne connaît que peu de choses à leur sujet et guère plus sur les conditions qui prévalaient en la matière dans la plupart de l'hémisphère Sud avant 1861.
- En moyenne, entre 1950 et 1993, les températures journalières minimum de l'air relevées de nuit à la surface des sols ont augmenté d'environ 0,2 °C tous les dix ans. Cela représente environ le double du taux d'augmentation des températures journalières maximum de l'air relevées pendant la journée (0,1 °C tous les dix ans). Dans de nombreuses régions situées sous des latitudes moyennes ou élevées, ce phénomène a allongé la saison sans gel. L'augmentation de la température à la surface de la mer au cours de cette période est égale à environ la moitié de l'augmentation moyenne de la température de l'air à la surface du sol.

Par *changement climatique*, le GIEC entend toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cette définition est différente de celle de la Convention-cadre des Nations Unies sur les *changements climatiques*, où l'on entend par changements climatiques "des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine, altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables."

Au total, 122 coordonnateurs et auteurs principaux, 515 auteurs collaborateurs, 21 éditeurs-réviseurs et 420 examinateurs.

Les délégations de 99 pays membres du GIEC ont participé à la Huitième session du Groupe de travail I à Shanghai, du 17 au 20 janvier 2001. Dans le présent résumé à l'intention des décideurs, le Deuxième Rapport d'évaluation du GIEC sera désormais mentionné sous l'acronyme "SAR".

En général l'évolution de la température est arrondie au plus proche 0,05 °C par unité de temps, les périodes prises en compte étant souvent limitées par la disponibilité des données.

La plupart du temps, on utilise le seuil de signification statistique de 5 pour cent et un intervalle de confiance de 95 pour cent.

Dans le présent résumé à l'intention des décideurs, ainsi que dans le résumé technique, les termes ci-après ont été utilisés, lorsque cela était approprié, pour donner une estimation de la confiance que l'on peut accorder à telle ou telle information ou donnée, en se fondant sur son jugement: *pratiquement certain* (plus de 99 chances sur 100 que le résultat soit exact); *très probable* (90-99 pour cent de chances); *probable* (66-90 pour cent de chances); *probabilité moyenne* (33-66 pour cent de chances); *improbable* (10-33 pour cent de chances); *très improbable* (1-10 pour cent de chances); *hautement improbable* (moins de 1 pour cent de chances). S'il souhaite obtenir davantage de détails, le lecteur peut se référer directement aux différents chapitres du présent rapport.

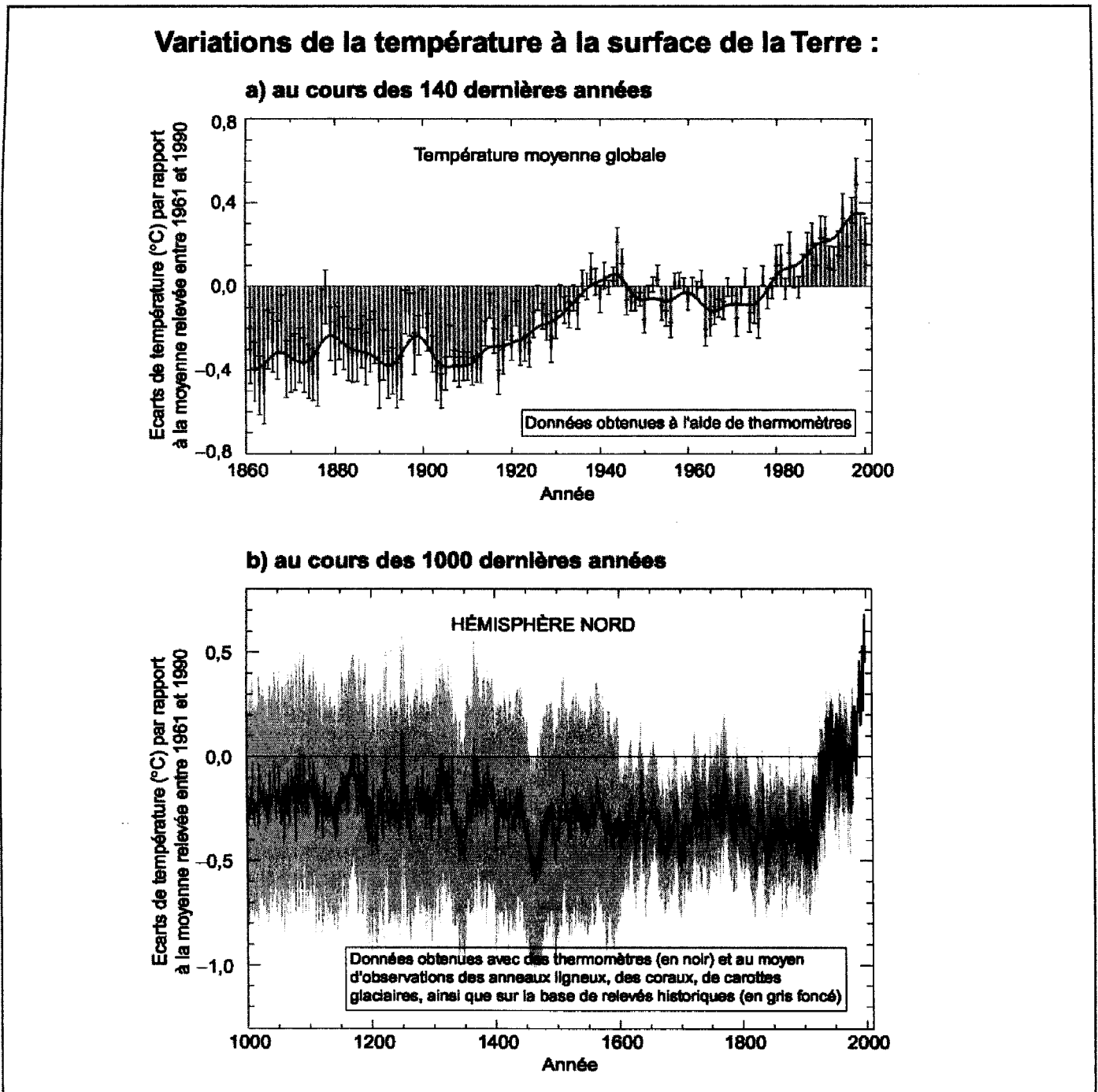


Figure SPM 1 — Variations de la température à la surface de la Terre au cours des 140 dernières années et au cours du dernier millénaire

- a) La température à la surface de la Terre est indiquée année par année (barres grises) et approximativement décennie par décennie (ligne bleue, la courbe annuelle filtrée supprimant les fluctuations au-dessous des échelles de temps quasi décennales). Il existe un certain nombre d'incertitudes en ce qui concerne les données annuelles (les barres noires minces comme des filaments représentent l'intervalle de confiance de 95 pour cent), dues à des insuffisances de données, à des erreurs et incertitudes instrumentales aléatoires, aux incertitudes dans les corrections de justesse des données relatives à la température à la surface des océans et aux ajustements de la température à la surface du sol en fonction des effets de l'urbanisation. Que ce soit au cours des 140 ou des 100 dernières années, l'augmentation de la température moyenne globale de surface a été, selon les meilleures estimations, de $0,6 \pm 0,2$ °C.
- b) De plus, les variations année par année (courbe gris foncé) et les variations moyennes sur 50 ans (courbe bleue) de la température moyenne à la surface dans l'hémisphère Nord au cours des 1000 dernières années ont été reconstruites à partir de données "indirectes" calibrées en fonction des données obtenues au moyen des thermomètres (voir la liste des principales données indirectes incluses dans le graphique). L'intervalle de confiance de 95 pour cent dans les données annuelles est représenté par la zone grise. Ces incertitudes deviennent plus importantes au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le passé et elles sont toujours plus marquées que celles inhérentes aux relevés effectués au moyen d'instruments car les données indirectes utilisées étaient alors relativement rares. A noter cependant que la rapidité et la durée du réchauffement au cours du XX^e siècle ont été beau-coup plus élevées qu'au cours de n'importe lequel des neuf siècles précédents. De même, il est probable que les années 90 aient été la décennie la plus chaude et 1998 l'année la plus chaude du millénaire. [Information basée sur a) chapitre 2, Figure 2.7c) et b) chapitre 2, Figure 2.20]

Les températures ont augmenté ces 40 dernières Le niveau moyen global des mers s'est élevé et années dans les 8 kilomètres les plus bas de la charge thermique des océans a augmenté. l'atmosphère.

- Depuis la fin des années 50 (c'est-à-dire la période au cours de laquelle l'on a commencé à faire des observations plus précises avec des ballons-sondes), la température globale a augmenté en général dans des proportions à peu près les mêmes – soit 0,1 °C tous les 10 ans – dans les 8000 mètres les plus bas de l'atmosphère qu'en surface.
- Depuis le début des relevés par satellite, en 1979, les mesures par ballons-sondes et par satellite ont toutes montré que la température moyenne globale dans les 8000 mètres les plus bas de l'atmosphère a augmenté de $0,05 \pm 0,10$ °C tous les 10 ans, mais aussi que la température moyenne globale à la surface s'est accrue de manière nettement plus importante, à savoir de $0,15 \pm 0,05$ °C tous les 10 ans. La différence entre les taux de réchauffement est statistiquement significative. Elle a été avant tout observée dans les régions tropicales et sub-tropicales.
- Les facteurs tels que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, les aérosols atmosphériques et le phénomène *El Nino* n'ont pas exercé les mêmes influences sur les 8000 mètres les plus bas de l'atmosphère qu'en surface. Il est par conséquent physiquement plausible qu'il puisse y avoir des disparités dans l'évolution des températures sur une brève période (par exemple 20 ans). De plus, les techniques de l'échantillonnage spatial peuvent elles aussi expliquer en partie certaines des différences observées dans ces évolutions, mais pas toutes.

La couverture neigeuse et les étendues glaciaires se sont réduites.

- Les données obtenues par satellite montrent qu'il est très probable⁷ que la couverture neigeuse ait diminué d'environ 10 pour cent depuis la fin des années 60, et des observations au sol indiquent qu'il est très probable⁷ qu'il y ait eu une réduction d'environ deux semaines de la durée annuelle du gel des lacs et des cours d'eau sous les latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord, pendant le XX^e siècle.
- Dans les régions autres que polaires, le recul des glaciers de montagne a été un phénomène largement répandu au XX^e siècle.
- Depuis les années 50, la surface de glace de mer au printemps et en été, dans l'hémisphère Nord, a diminué d'environ 10 à 15 pour cent. Il est probable⁷ qu'il y ait eu ces dernières décennies une réduction d'environ 40 pour cent de l'épaisseur de glace dans l'océan Arctique de la fin de l'été au début de l'automne, ainsi qu'une réduction nettement plus lente de l'épaisseur des glaces de mer en hiver.

- Les données marégraphiques montrent que le niveau moyen global de la mer s'est élevé de 0,1 à 0,2 mètres au cours du XX^e siècle.
- La charge thermique globale des océans s'est accrue depuis la fin des années 50, période pour laquelle l'on a pu procéder à des observations plus précises des températures sous la surface de l'océan.

Des changements se sont également produits dans d'autres aspects importants du climat.

- Il est très probable⁷ qu'au XX^e siècle les précipitations se soient accrues de 0,5 à 1 pour cent tous les 10 ans sous la plu-part des latitudes moyennes et élevées des continents de l'hémisphère Nord et il est probable⁷ que les pluies se soient accrues de 0,2 à 0,3 pour cent dans les zones terrestres tropicales (10° Nord à 10° Sud). Sous les tropiques, ces augmentations n'ont pas été évidentes ces dernières décennies. Il est également probable⁷ que les pluies aient diminué dans la plu-part des zones terrestres sub-tropicales de l'hémisphère Nord (10° Nord à 30° Nord) au cours du XX^e siècle, et ce d'environ 0,3 pour cent tous les 10 ans. Contrairement à ce qui s'est passé dans l'hémisphère Nord, aucun changement systématique comparable n'a été détecté dans les moyennes générales pour les différentes latitudes dans l'hémisphère Sud. Les données disponibles ne sont pas suffisantes pour déterminer les tendances des précipitations sur les océans.
- Au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, il est probable⁷ que sous les latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord la fréquence des événements de précipitations importantes ait augmenté de 2 à 4 pour cent. Cette augmentation peut être due à plusieurs causes, par exemple les changements de l'humidité atmosphérique, l'activité orageuse et les phénomènes dépressionnaires à grande échelle.
- Il est probable⁷ qu'il y ait eu au XX^e siècle une augmentation de 2 pour cent de la couverture nuageuse sur les zones terrestres des latitudes moyennes et élevées. Dans la plupart de ces zones, cette tendance correspond bien à la diminution des écarts de température journaliers, telle qu'elle a été observée.
- Il est très probable⁷ que depuis 1950 il y ait eu une diminution de la fréquence des températures extrêmement basses ainsi qu'une augmentation, plus modeste, de la fréquence des températures extrêmement élevées.
- Les épisodes de réchauffement du phénomène *El Nino*/oscillation australe (ENSO) (qui affecte régulièrement les variations régionales des précipitations et des températures dans la plupart des zones tropicales et sub-tropicales et dans certaines zones de moyenne latitude) ont été plus fréquents, plus persistants et plus intenses depuis le milieu des années 70 qu'au cours des 100 dernières années.

□ Au XX^e siècle (1900 à 1995), l'on a assisté à une augmentation relativement faible des surfaces émergées globales ayant connu une grave sécheresse ou au contraire des précipitations catastrophiques. Dans de nombreuses régions, ces changements sont dominés par la variabilité interdécennale et multidécennale du climat, tels que la tendance de l'ENSO à provoquer un plus grand nombre d'événements de réchauffement.

□ Dans plusieurs régions, par exemple certaines parties de l'Asie et de l'Afrique, les observations ont montré que la fréquence et l'intensité des sécheresses ont augmenté.

Il semble que certains aspects importants du climat n'aient pas changé.

□ Un petit nombre de régions du globe ne se sont pas réchauffées ces dernières décennies; il s'agit essentiellement de certaines parties des océans de l'hémisphère Sud et de certaines parties de l'Antarctique.

□ L'on n'a observé aucune évolution significative de la surface des glaces de mer dans l'Antarctique depuis 1978, date à laquelle a commencé la période des mesures fiables par satellite.

□ Au niveau global, les changements dans l'intensité et la fréquence des tempêtes tropicales et extratropicales sont dominés par les variations interdécennales et multidécennales, mais aucune tendance significative ne s'est dégagée au XX^e siècle. Les analyses, contradictoires, ne permettent pas de tirer des conclusions définitives quant à l'évolution de l'activité dépressionnaire, notamment dans les zones extratropicales.

□ Aucune modification systématique de la fréquence des tornades, des journées d'orage ou des chutes de grêle ne ressort des analyses effectuées dans un certain nombre de zones limitées.

Les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines continuent de modifier l'atmosphère d'une façon telle qu'il faut s'attendre à ce qu'elles aient des répercussions sur le climat.

Les changements climatiques sont dus à la fois à la variabilité interne du système climatique et à des facteurs extérieurs (naturels et d'origine anthropique). L'influence des différents facteurs extérieurs sur le climat peut être schématiquement comparée en utilisant la notion de forçage radiatif⁸. Un forçage radiatif positif, tel que celui produit par des concentrations croissantes de gaz à effet de serre, a tendance à réchauffer la surface de la planète. Un forçage radiatif négatif, qui peut être dû à une augmentation de

certain types d'aérosols (particules microscopiques véhiculées par l'air) a tendance à refroidir la surface. Des facteurs naturels tels que les changements du rayonnement solaire ou de l'activité volcanique explosive peuvent eux aussi provoquer un forçage radiatif. Une typologie de ces agents de forçage du climat et de leur évolution au fil du temps (voir figure SPM 2) est nécessaire pour comprendre les changements climatiques passés dans le contexte des variations naturelles et pour projeter les changements climatiques qui pourraient se produire dans le futur. La figure SPM 3 indique les estimations actuelles du forçage radiatif dû à des concentrations accrues de constituants atmosphériques et à d'autres mécanismes.

Les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et leur forçage radiatif ont continué d'augmenter à cause des activités humaines.

□ La concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO₂) a augmenté de 31 pour cent depuis 1750. La concentration actuelle de CO₂ n'avait encore jamais été atteinte au cours des 420000 dernières années et probablement⁷ pas non plus au cours des 20 millions d'années précédentes. Le taux d'augmentation actuel est sans précédent depuis au moins 20000 ans.

□ Environ les trois quarts des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère au cours des 20 dernières années sont dues à la combustion de combustibles fossiles. Le reste est imputable, pour l'essentiel, aux modifications de l'utilisation des sols, et plus particulièrement au déboisement.

□ Aujourd'hui, les océans et les terres absorbent environ la moitié des émissions anthropiques de CO₂. Sur terre, l'absorption de CO₂ anthropique dépasse très probablement⁷ le volume des émissions de CO₂ dues au déboisement pendant les années 90.

□ Le taux d'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a été d'environ 1,5 ppm (0,4 pour cent) par an ces 20 dernières années. Pendant les années 90, l'augmentation d'une année sur l'autre a varié de 0,9 ppm⁹ (0,2 pour cent) à 2,8 ppm (0,8 pour cent). Une grande partie de cette variabilité est due à l'effet de la variabilité du climat (par exemple, le phénomène *El Nino*) sur l'absorption et l'émission de CO₂ par les terres et les océans.

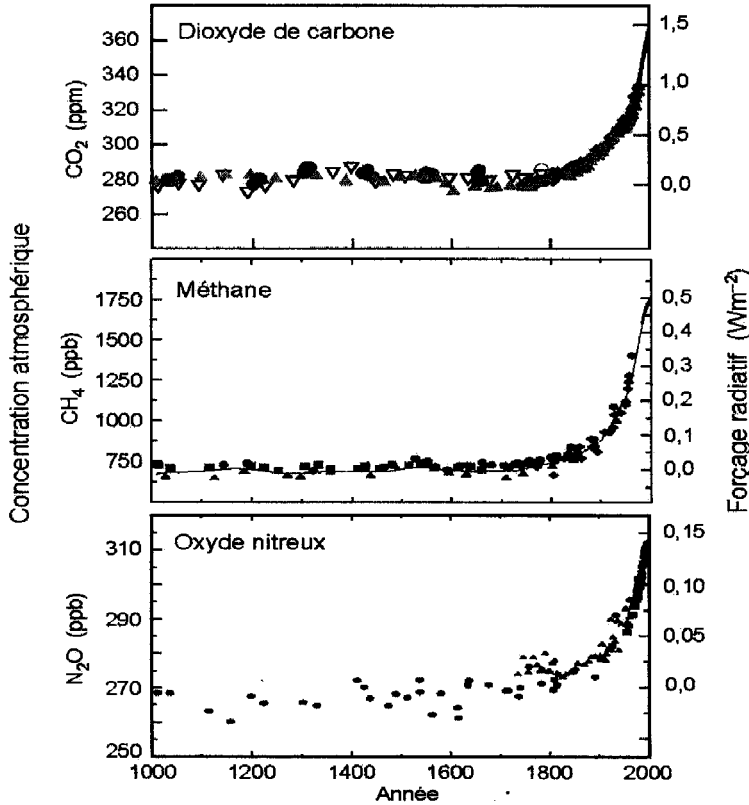
□ La concentration atmosphérique de méthane (CH₄) s'est accrue de 1060 ppb⁹ (151 pour cent) depuis 1750 et elle continue d'augmenter. Depuis 420000 ans, la concentration de CH₄ n'avait jamais atteint le niveau actuel. La croissance annuelle de cette concentration a ralenti et est devenue plus variable dans les années 90 que dans les années 80. Un peu plus de la moitié des émissions actuelles de CH₄ sont d'origine humaine (par exemple : combustion de combustibles fossiles, bétail, culture du riz, décharges). De plus, les émissions

⁸ Le forçage radiatif est une mesure de l'influence d'un facteur sur la modification de l'équilibre entre l'énergie entrante et l'énergie sortante dans le système sol-atmosphère, et il constitue un indicateur de l'importance du facteur en question comme mécanisme potentiel des changements climatiques. Il est exprimé en watts par mètre carré (W m⁻²).

⁹ ppm (parties par million) ou ppb (parties par milliard): ratio entre le nombre de molécules de gaz à effet de serre et le nombre total de molécules d'air sec. Par exemple: 300 ppm signifie 300 molécules de gaz à effet de serre par million de molécules d'air sec.

Indicateurs de l'influence de l'homme sur l'atmosphère pendant l'ère industrielle

a) Concentrations atmosphériques globales de trois gaz à effet de serre bien mélangés



b) Aérosols de sulfate déposés dans les glaces du Groenland

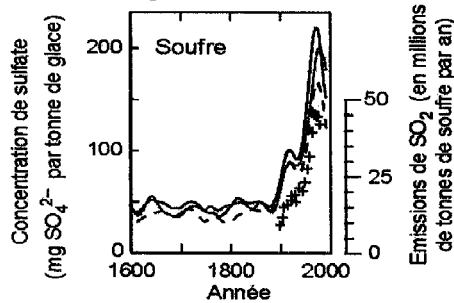


Figure SPM 2 — Les relevés, sur de longues périodes, de l'évolution passée de la composition de l'atmosphère permettent de mieux connaître le contexte de l'influence des émissions anthropiques.

a) Indique les changements dans les concentrations atmosphériques de gaz carbonique (CO₂), de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) ces 1000 dernières années. Les données obtenues sur plusieurs sites de l'Antarctique et du Groenland (indiquées par des symboles différents) en analysant les carottes de glace et les échantillons provenant de névés sont complétées par celles obtenues lors de l'analyse d'échantillons atmosphériques directs effectués ces dernières décennies (indiquées par la ligne correspondant à la moyenne globale de CH₄). Le forçage radiatif positif estimé du système climatique résultant de ces gaz ayant une durée de vie dans l'atmosphère de 10 ans ou plus, ils sont bien mélangés et leur concentration reflète des émissions de sources différentes dans le monde entier. Les trois relevés montrent les effets de la croissance déjà importante mais qui ne fait que se renforcer des émissions anthropiques pendant l'ère industrielle.

b) Illustre l'influence des émissions industrielles sur les concentrations de sulfate dans l'atmosphère, qui produit un forçage radiatif négatif. La courbe montre l'évolution, dans le temps, des concentrations de sulfate, non pas dans l'atmosphère mais dans des carottes glaciaires au Groenland (indiquée par des lignes; les effets épisodiques des éruptions volcaniques n'ont pas été pris en compte). Ces données indiquent les dépôts locaux d'aérosols sulfatés sur le site, qui reflètent les émissions de dioxyde de soufre (SO₂) sous les latitudes moyennes de l'hémisphère Nord. Ce relevé, bien que plus régional que celui des gaz à effet de serre mélangés au niveau global, montre l'importance de la croissance des émissions de SO₂ anthropiques pendant l'ère industrielle. Les signes "+" correspondent aux émissions régionales pertinentes de SO₂ telles qu'elles ont été estimées (échelle de droite).

[Basé sur a) Chapitre 3, Figure 3.2b (CO₂); Chapitre 4, Figure 4.1a et b (CH₄) et Chapitre 4, Figure 4.2 (N₂O) et b) Chapitre 5, Figure 5.4a]

de monoxyde de carbone (CO) ont récemment été identifiées comme l'une des causes de l'augmentation de la concentration de CH₄.

Les aérosols d'origine anthropique ont une durée de vie courte dans l'atmosphère et la plupart d'entre eux produisent un forçage radiatif négatif.

- La concentration atmosphérique d'oxyde nitreux (N₂O) a augmenté de 46 ppb (17 pour cent) depuis 1750 et elle continue de croître. La concentration actuelle de N₂O n'avait jamais atteint ce niveau depuis au moins les 1000 dernières années. Environ un tiers des émissions actuelles de N₂O sont d'origine humaine (par exemple : terres cultivées, aliments pour bétail, industrie chimique).
 - Depuis 1995, les concentrations atmosphériques de plusieurs de ces gaz halocarbonés, qui sont à la fois des gaz qui appauvrissent la couche d'ozone et des gaz à effet de serre (par exemple: CFC₁₃ et CF₂Cl₂) augmentent de manière moins rapide ou diminuent, du fait de la réduction des émissions dans le cadre de la réglementation prévue par le protocole de Montréal et ses amendements. Leurs composés de remplacement (par exemple : CHF₂Cl et CF₃CH₂F) de même que d'autres composés synthétiques (par exemple : les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆)) sont eux aussi des gaz à effet de serre et leurs concentrations sont aujourd'hui en augmentation.
 - Le forçage radiatif dû aux augmentations des gaz à effet de serre bien mélangés entre 1750 et 2000 est estimé à 2,43 Wm⁻²; 1,46 Wm⁻² dû au CO₂; 0,48 Wm⁻² dû au CH₄; 0,34 Wm⁻² dû aux gaz halocarbonés; et 0,15 Wm⁻² dû au N₂O. (voir figure SPM 3, dans laquelle les incertitudes sont également indiquées.)
 - L'appauvrissement de la couche d'ozone (O₃) stratosphérique tel qu'il a été observé entre 1979 et 2000 aurait provoqué, selon les estimations, un forçage radiatif négatif (-0,15 Wm⁻²). En supposant que la réglementation en vigueur sur les gaz halocarbonés soit totalement respectée, le forçage positif des gaz halocarbonés sera réduit, de même que l'ampleur du forçage négatif dû à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, au fur et à mesure que la couche d'ozone se reconstituera au XXI^e siècle.
 - Selon les estimations, le volume total de O₃ dans la troposphère a augmenté de 36 pour cent depuis 1750, essentiellement en raison des émissions anthropiques de plusieurs gaz contribuant à la formation du O₃. Cela correspond à un forçage radiatif positif de 0,35 Wm⁻². Le forçage dû à O₃ varie considérablement d'une région à l'autre et réagit beaucoup plus rapidement aux changements dans les émissions que les gaz à effet de serre à durée de vie longue tel que le CO₂.
 - Les principales sources d'aérosols anthropiques sont la combustion des combustibles fossiles et de la biomasse. Ces sources sont également liées à la dégradation de la qualité de l'air et aux retombées acides.
 - Depuis le Deuxième Rapport d'évaluation, des progrès significatifs ont été enregistrés en ce qui concerne une quantification plus précise des rôles radiatifs directs des différents types d'aérosols. On estime que le forçage radiatif direct est de -0,4 Wm⁻² pour les sulfates, de -0,2 Wm⁻² pour les aérosols provenant de la combustion de la biomasse, de -0,1 Wm⁻² pour les aérosols carbonés organiques provenant de la combustion des combustibles fossiles et de +0,2 Wm⁻² pour les aérosols carbonés noirs provenant de la combustion des combustibles fossiles. Les experts sont beaucoup moins confiants dans leur capacité à quantifier l'effet direct total des aérosols et son évolution dans le temps que l'effet et l'évolution des gaz susmentionnés. Les aérosols varient également considérablement selon les régions et réagissent rapidement aux changements dans les émissions.
 - Outre leur forçage radiatif direct, les aérosols ont un forçage radiatif indirect de par leurs effets sur les nuages. Il existe aujourd'hui davantage d'éléments de preuve de l'existence de cet effet indirect, qui est négatif, mais dont l'ampleur reste très incertaine.
- Au siècle dernier, les facteurs naturels n'ont que peu contribué au forçage radiatif.*
- Le forçage radiatif dû aux changements dans le rayonnement solaire observés depuis 1750 est estimé à environ +0,3 Wm⁻², et la plus grosse partie de ce forçage est survenue au cours de la première moitié du XX^e siècle. Depuis la fin des années 70, les instruments embarqués sur les satellites ont observé de faibles oscillations dues au cycle solaire de 11 ans. On a proposé un certain nombre de mécanismes visant à amplifier les effets du Soleil sur le climat, mais ces mécanismes ne peuvent pour le moment s'appuyer sur des théories ou des observations rigoureuses.
 - Les aérosols stratosphériques émis lors des éruptions volcaniques explosives engendrent un forçage négatif qui dure quelques années. Plusieurs éruptions majeures ont eu lieu au cours des périodes 1880 - 1920 et 1960 - 1991.
 - Selon les estimations, l'évolution combinée du forçage radiatif due aux deux principaux facteurs naturels (la variation du rayonnement solaire et les aérosols volcaniques) a été négative ces 20, voire 40 dernières années.

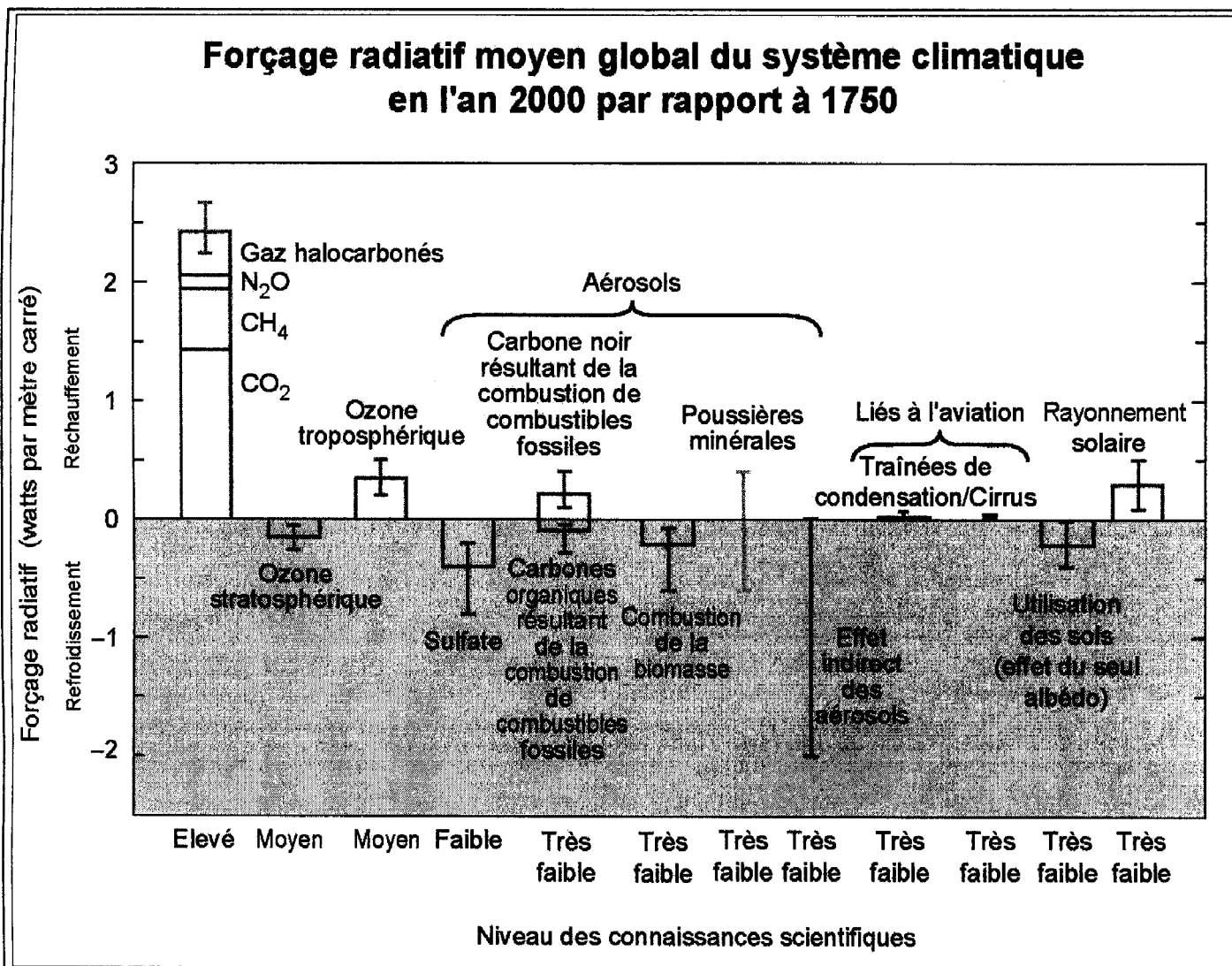


Figure SPM 3 — De nombreux facteurs extérieurs ont une influence sur les changements climatiques.

Ces forçages radiatifs résultent des changements dans la composition de l'atmosphère, de la modification de la réflectivité en surface par une nouvelle affectation des sols et de la variation du rayonnement solaire. L'activité humaine est liée à chacun de ces facteurs, à l'exception de la variation du rayonnement solaire. Les barres rectangulaires représentent les estimations des contributions de ces forçages – dont certains produisent un réchauffement et d'autres un refroidissement. Le forçage dû à des événements volcaniques épisodiques, qui provoquent un forçage négatif ne durant que quelques années, n'est pas indiqué. L'effet indirect des aérosols, tel qu'illustré dans cette figure, est leur effet sur la taille et le nombre des gouttelettes nuageuses. Un deuxième effet indirect des aérosols sur les nuages, à savoir leur effet sur la durée de vie des nuages, qui provoquerait lui aussi un forçage négatif, n'est pas indiqué. Les effets de l'aviation sur les gaz à effet de serre sont inclus dans chacune des barres. La ligne verticale de chaque côté des barres rectangulaires donne la gamme des estimations, basée sur la dispersion des valeurs publiées des forçages et sur les connaissances physiques du phénomène. Certains des forçages présentent un degré de certitude bien plus élevé que d'autres. Une ligne verticale sans barre rectangulaire est indicatrice d'un forçage pour lequel l'on n'a pas la possibilité de fournir la meilleure estimation en raison de l'existence d'importantes incertitudes. Comme nous l'avons déjà fait observer, le niveau général des connaissances scientifiques varie considérablement d'un forçage à l'autre. Certains agents du forçage radiatif, tels que le CO₂, sont bien mélangés à l'échelle mondiale, ce qui perturbe le bilan thermique global. D'autres, tels que les aérosols, ont une répartition spatiale telle qu'elle les conduit à perturber ce bilan avec des signatures régionales beaucoup plus marquées. Pour cette raison et pour d'autres encore, on ne saurait s'attendre à ce que la simple somme des barres positives et négatives indique l'effet net sur le système climatique. Les simulations de ce rapport d'évaluation (par exemple la Figure SPM 5) montrent que l'effet net estimé de ces perturbations est un réchauffement du climat global depuis 1750.

[Basé sur le Chapitre 6, Figure 6.6]

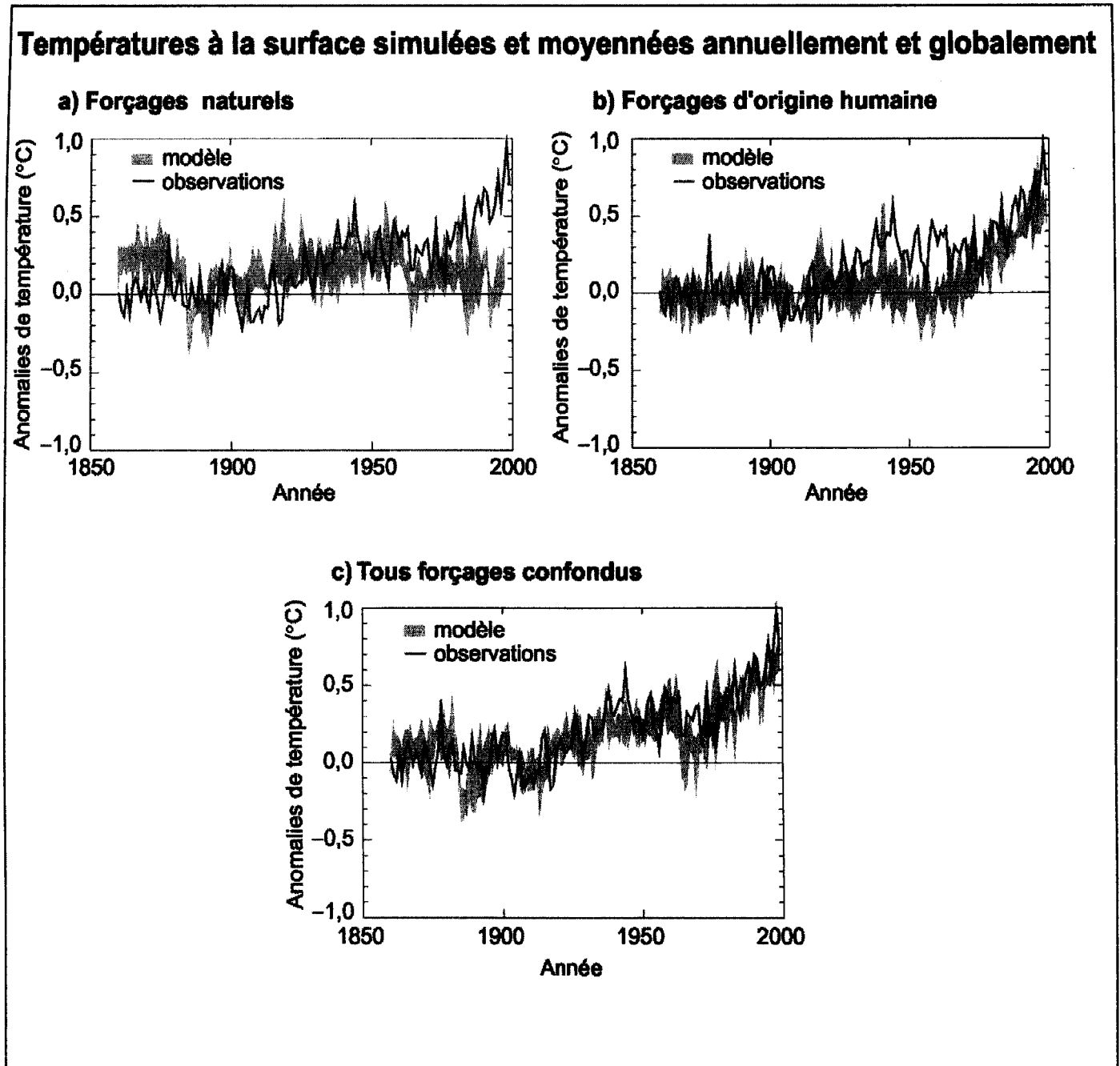


Figure SPM 4 — La simulation des variations de température de la Terre et la comparaison des résultats aux changements mesurés permettent de mieux connaître les causes profondes des principaux changements.

Un modèle climatique peut être utilisé pour simuler les changements de température dus à la fois à des causes naturelles et à des causes anthropiques. Les simulations représentées par la bande large dans *a)* n'ont été effectuées qu'avec les forçages naturels: la variation du rayonnement solaire et de l'activité volcanique. Les simulations comprises dans la bande large de la Figure *b)* ont été effectuées avec les forçages anthropiques: les gaz à effet de serre et une estimation des aérosols sulfatés, et les estimations comprises dans la bande large de la Figure *c)* ont été effectuées à la fois avec les forçages naturels et avec les forçages anthropiques. La Figure *b)* montre que l'inclusion des forçages anthropiques offre une explication plausible pour une partie importante des changements de température observés au siècle dernier, mais la correspondance la plus étroite avec les observations est obtenue dans la Figure *c)*, dans laquelle sont inclus à la fois les facteurs naturels et les facteurs anthropiques. Ces résultats montrent que les forçages inclus sont suffisants pour expliquer les changements observés, sans exclure pour autant la possibilité que d'autres forçages puissent eux aussi avoir contribué à ces changements. Les bandes larges des résultats du modèle présentées ici ont été obtenues en appliquant à quatre reprises le même modèle. Des résultats semblables à ceux de la Figure *b)* ont été obtenus avec d'autres modèles incluant le forçage anthropique.

[Basé sur le Chapitre 12, Figure 12.7].

