



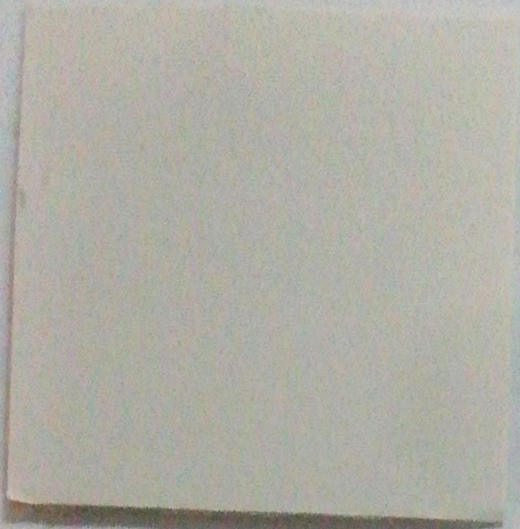
Passé,  
présent,  
futur

# CLIMATS

MARIE-ANTOINETTE MÉLIÈRES  
CHLOÉ MARÉCHAL

Préface de NICOLAS HULOT

Belin:



Passé,  
présent,  
futur

# CLIMATS

Belin:

L'édition initiale de ce livre est la version française de *Climat et Société – Climats passés, passage de l'homme, climat futur: repères essentiels* éditée en 2010 par le Centre régional de documentation pédagogique (CRDP) de Grenoble, dont R. Briatte et S. Duchaffaut en ont été les instigateurs: nous les en remercions profondément. Une version réactualisée et enrichie a ensuite été publiée en anglais par les éditions Wiley Blackwell en 2015, *Climate change: Past, Present and Future*. Nous sommes vivement reconnaissantes à tous les scientifiques et organismes qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage. Un grand merci en particulier à P. Gibbard, R. Bradley, G. Brasseur, H. Letreut, J.-C. Hourcade et N. Roberts ainsi qu'au Centre national du livre, la Région Rhône-Alpes, la Fondation Ferthé et la Fondation Nicolas Hulot. L'ouvrage actuel est une adaptation de l'édition anglaise.

De nombreux scientifiques et diverses organisations, en particulier l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC en français), nous ont généreusement accordé l'autorisation de reproduire des figures, ce qui a largement agrémente l'illustration de cet ouvrage. Nous leur en sommes très amplement reconnaissantes.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à celles et ceux de nos collègues qui ont contribué par leur relecture partielle à la mise au point des manuscrits successifs et qui nous ont fait part de leurs critiques constructives, en particulier V. Badeau, G. Beaugrand, B. Barnier, P. Braconnot, J.-P. Brugal, C. Cassou, A. Cazenave, I. Chuine, J.-L. Dufresnes, G. Favreau, M. Fontugne, M. Magny, V. Masson-Delmotte, H. Mercier, J.-J. Moisselin, J. Orr, J.-R. Petit, S. Planton, E. Rignot, C. Robinet, D. Sallas, M. Schneider, J. Severinghaus, C. Vincent, T. Vischel, C. Waelbroeck. Tous nos remerciements vont également aux collègues qui nous ont apporté une précieuse collaboration à travers les discussions que nous avons eues et les informations qui en ont découlé, venues préciser le contenu de cet ouvrage. La liste est longue, citons en particulier E. Bard, D. Bourg, W. Barthlott, O. Boucher, J. Blondel, J. Chappelaz, P. Ciais, N. Coltice, D. Couvet, M. De Angelis, G. Delaygues, V. Devictor, G. Escarguel, B. Francou, S. Gillihan, A. Hauchecorne, G. Jone, J. Jouzel, E. Lemeur, M.-F. Loutre, L. Mercalli, C. Mora, F. Parrenin, R. Ricklefs, M. Sato, et P. Seguin.

Enfin, un très grand merci à E. Geissler, M. Chenevier, pour leur disponibilité sans relâche et leur analyse critique de physiciens chevronnés, ainsi qu'à H. Cox et R. Cox qui nous ont constamment épaulées au cours de ce travail.

Nous souhaitons clore cette rubrique en mentionnant le rôle capital joué par nos universités respectives, l'université de Grenoble-Alpes et l'université Claude Bernard Lyon-1, composante de l'université de Lyon, qui nous ont permis de développer notre formation dans ce domaine et de bénéficier de contacts scientifiques enrichissants.

*Pour la partie traduite de l'édition anglaise de Wiley Blackwell :*

Original title : *Climate Change. Past, Present and Future*

This edition first published 2015 © by John Wiley & Sons Ltd

© CRDP Académie de Grenoble, first published 2010 as *Climat et société*.

*Climats passés, passage de l'homme, climats futurs: repères essentiels* by Marie-Antoinette Mélières and Chloé Maréchal.

All Rights Reserved. This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5]; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

© Belin Éditeur / Humensis, 2020

170 bis, boulevard du Montparnasse, 75680 Paris cedex 14

ISBN 978-2-410-01735-9

# Préface

## Comprendre la complexité du climat pour mieux agir

Nous sommes à la croisée des chemins, l'avenir dépend encore de nous mais pour une période courte.

Nous avons des choix radicaux à opérer, et ils ne peuvent se faire que sous un éclairage rationnel. Dans cette période de confusion où le réel et le virtuel se confondent, le faux et le vrai se combinent et l'essentiel ne se distingue plus du superflu, plus que jamais la voix de la science nous est nécessaire. Elle doit être notre fil d'Ariane pour changer de matrice.

En ce moment singulier du siècle où l'humanité peut vivre le risque d'une évolution non souhaitable et irréversible de la biosphère sous l'effet du changement climatique, l'ouvrage très approfondi de Marie-Antoinette Mélières et Chloé Maréchal met à disposition de chacun les bases scientifiques nécessaires à la compréhension de cet enjeu vital.

L'ampleur et la complexité des connaissances mobilisées, comme les échelles de temps et d'espace, sont toutes indispensables pour appréhender et comprendre les mécanismes physiques et biologiques à l'origine du climat actuel de la Terre et de son évolution au cours des âges.

L'ouvrage initial a été publié en 2015. Il vient d'être réactualisé pour inclure l'évolution récente des connaissances sur le réchauffement climatique. Il s'appuie sur le rapport du GIEC 2013 (*The Physical Science Basis*), ainsi que sur les publications scientifiques les plus récentes. Sans jargon mais précis, il offre des explications claires, appuyées sur un appareil graphique et illustratif de grande qualité. Il a en outre l'intérêt de répondre de manière explicite aux questions les plus souvent formulées dans le débat public sur le sujet. S'il vise le lectorat des enseignants et des étudiants, il pourrait intéresser les journalistes qui peuvent y trouver matière à s'informer, mais également les scientifiques de toutes disciplines.

Ne l'oublions pas ! Parce qu'ils sont à la base de la vie et la vie même, climat et biodiversité constituent des biens publics universels pour l'ensemble des communautés humaines. Les États, comme les individus, sont invités à imaginer ensemble de nouveaux rapports dans l'accès comme dans l'utilisation de ces biens. Pour bâtir cette réflexion et se mettre en marche, il est essentiel de mettre à disposition de tous une information scientifique rigoureuse, dépourvue d'idéologie. Il appartient en effet à chacun d'entre nous d'imaginer et de conduire ce changement d'ère inédit dans l'histoire de l'humanité.

Face à cet enjeu universel et parce que le climat n'a pas de frontière, c'est désormais la famille humaine qui est au pied du mur, car au cœur de l'éprouvette.

Je souhaite que cet ouvrage contribue à élargir notre champ de vision en reliant les trois composantes, trop souvent séparées, d'une même réalité : la société, la biodiversité et le changement climatique. Reconnaître notre part de responsabilité c'est ouvrir tout le champ des possibles. Dans une conscience universelle des risques globaux où personne n'est immunisé par un statut économique, politique ou juridique, il nous revient de saisir cette belle opportunité de repenser nos modes de vie et d'organisation pour retrouver une co-évolution et une co-viabilité possibles avec le tissu vivant de la Terre et son climat.

Notre intelligence est mise en demeure, elle doit prendre en charge les conséquences de son propre succès, ce ne devrait pas être une charge trop accablante. C'est sans doute l'ultime phase pour accomplir notre devoir d'humanité. Nous sommes brutalement et providentiellement confronté à la question et à l'exigence du sens.

Saisissons notre chance et, ensemble dans une vision holistique, ouvrons la voie du chapitre 2 de notre histoire pour ne pas sacrifier l'avenir au présent.

Nicolas Hulot  
*Président de la Fondation Nicolas Hulot pour la nature et l'Homme*  
[www.fnh.org](http://www.fnh.org)

*L'ouvrage a été publié en 2015. L'édition présente a été réactualisée en 2019, incluant l'évolution récente des connaissances sur le réchauffement climatique.*

## Pourquoi ce livre sur le changement climatique ?

Le réchauffement climatique – dont l'appellation fait référence à une augmentation moyenne de l'énergie à la surface de la Terre, provoquant un réchauffement dit « global » – est une question mise à l'ordre du jour au niveau mondial depuis la fin du xx<sup>e</sup> siècle et le GIEC de 1992 (voir encadré, p. 10). Elle suscite cependant de fortes controverses en raison de l'immense mutation économique mondiale que demande la maîtrise de ce réchauffement d'origine anthropique.

Une partie de la population met en doute, soit ce réchauffement, soit le rôle de l'homme (les « climatosceptiques »). Une autre reste largement perplexe devant la complexité de cette question et n'en demeure pas convaincue. Des dirigeants de pays puissants n'y échappent pas malgré la déferlante scientifique qui étaye ces faits. En 2019, le constat se fait qu'un grand nombre d'habitants de la planète, des dirigeants au simple citoyen, restent dubitatifs sur la réalité de l'importance de l'évolution climatique de la planète.

Ce livre a pour but de synthétiser l'ensemble des connaissances permettant de se construire une opinion sur la réalité du réchauffement climatique, ses causes, et son impact.

Notre approche est pragmatique compte tenu du très grand nombre de disciplines impliquées : construire les « principaux repères » qui jalonnent la question du changement climatique avec, pour fil directeur, les interrogations suivantes :

- ▶ 1. Le réchauffement en cours est-il important ? Quelles sont ses manifestations ?
- ▶ 2. Dans quelle limite sort-il, ou non, des fluctuations naturelles du climat ?
- ▶ 3. À quoi est-il dû ? Est-il en relation, ou non, avec l'augmentation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre d'origine humaine ?
- ▶ 4. Si l'activité humaine est impliquée, comment se manifestera le réchauffement dans le futur, dans les prochaines décennies, et au cours du xxi<sup>e</sup> siècle ?

• À la conclusion, on se rappelle les productions caractéristiques du climat que la planète a été expérimentée, quel a été le bilan des années à leur prix ? Pourquoi ? Sur quel scénario d'avenir faut-il se focaliser ?

On se rappelle à ce propos le rôle des océans, avec une attention particulière sur le climat arctique (partie II) et la compréhension comment fonctionnent le climat et quels sont les mécanismes physiques qui régissent l'équilibre climatique arctique (parties I et II) avec en particulier les effets des oscillations climatiques (partie III), ce qui nous permettra d'étudier les climats passés et leur cause (partie IV) afin de se concentrer sur la réchauffement arctique, son impact, ses causes (partie V). Constatons les climats passés, l'impact arctique, et la réchauffement arctique, le bilan des années à leur prix ? Pourquoi ? Sur quel scénario d'avenir faut-il se focaliser ?

### IPCC et GIEC

L'Intergouvernemental Panel on Climate Change, ou IPCC (en français le GIEC), est une organisation internationale qui a pour but de évaluer le climat et de faire un rapport sur l'évolution de l'atmosphère mondiale (AMM) et le programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUD). Son objectif est de fournir des informations scientifiques de base sur les causes du climat et de fournir des informations scientifiques, techniques et autres pertinentes relatives au climat, à l'impact et à l'adaptation des systèmes. Il a pour but de fournir des informations utiles

de base aux négociations lors des Conférences des Parties (COP) de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCC/CNCC). Les rapports de l'IPCC sont les suivants : le 1<sup>er</sup> rapport sur l'évaluation a été publié en 1995, le 2<sup>e</sup> rapport sur les scénarios en 1996, le 3<sup>e</sup> rapport sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité en 2001, le 4<sup>e</sup> rapport de synthèse en 2007.

L'IPCC est le premier intergouvernemental d'origine mondiale et l'organisme de la communauté scientifique internationale chargé de produire les rapports de l'IPCC et le rapport

# Table des matières

Préface : Comprendre la complexité du climat pour mieux agir.....	7
Introduction.....	9
<i>Encadré</i> IPCC ou GIEC.....	10

## PARTIE I

<b>Le climat sur Terre et son moteur: l'énergie</b> .....	11
<b>CHAPITRE 1</b> Pourquoi y a-t-il des climats si différents sur Terre?.....	13
<i>Encadré</i> Les saisons.....	15
<b>CHAPITRE 2</b> Des climats variés et une vie diversifiée.....	17
■ Les différents climats sur Terre.....	17
■ Climats, biomes et biodiversité.....	18
Leur répartition.....	18
Biodiversité.....	22
■ Climat et société.....	22
<b>CHAPITRE 3</b> D'une mosaïque de climats à la définition d'un climat moyen.....	25
■ La température et l'équilibre thermique.....	25
<i>Encadré</i> L'échelle de température.....	26
La température, indicateur de l'énergie.....	26
Équilibre thermique – Équilibre énergétique.....	27
■ La température moyenne globale de la surface terrestre.....	27
■ La quantité d'eau reçue.....	30
■ Les vents.....	31
<i>Encadré</i> L'énergie liée au mouvement des masses d'air.....	32
■ Trois « postes » clés, consommateurs d'énergie.....	32

<b>CHAPITRE 4</b> Le climat moyen sur Terre .....	33
■ Le pourvoyeur d'énergie : le Soleil .....	33
■ L'équilibre énergétique à la surface de la Terre .....	34
Cas 1 : une Terre sans atmosphère, totalement absorbante .....	34
Cas 2 : une Terre sans atmosphère, en partie réfléchissante .....	35
Cas 3 : une Terre avec atmosphère .....	35
<i>Encadré</i> L'équilibre thermique : l'image du bol de soupe .....	36
<b>CHAPITRE 5</b> Atmosphère et océan : deux acteurs de première importance dans l'équilibre climatique .....	39
■ Les forces qui agissent .....	39
■ Atmosphère .....	40
■ Composition, pression et température .....	40
La circulation atmosphérique : une organisation à caractère zonal .....	43
■ Océan .....	48
La circulation océanique .....	49
L'équilibre du CO <sub>2</sub> entre atmosphère et océan .....	56
■ Transport de chaleur équateur-pôles .....	58
Résumé .....	59

## PARTIE II

<b>Zoom sur le bilan d'énergie de la planète</b> .....	61
<b>CHAPITRE 6</b> Rayonnement thermique, rayonnement solaire et rayonnement tellurique .....	63
■ Le rayonnement thermique émis par le corps noir .....	63
■ Lois d'émissions du corps noir .....	64
■ Rayonnement solaire et rayonnement tellurique .....	65
<b>CHAPITRE 7</b> L'impact de l'atmosphère sur le rayonnement .....	67
■ Diffusion et réflexion .....	67
■ Absorption par un gaz – L'approximation de coupure .....	68
Loi d'absorption de Beer-Lambert .....	68
L'approximation de coupure .....	70
■ Absorption par l'atmosphère dans le solaire et le tellurique .....	71
Les estimations .....	71
Absorption des rayonnements solaires et telluriques .....	72
<i>Encadré</i> Absorption du rayonnement tellurique par le CO <sub>2</sub> atmosphérique .....	73
■ Transfert direct par l'atmosphère .....	74
■ Les constituants atmosphériques majeurs impliqués dans le transfert radiatif .....	75

<b>CHAPITRE 8</b>	<b>Transfert du rayonnement au travers de l'atmosphère</b>	79
■	Les trois mécanismes radiatifs qui chauffent ou refroidissent la surface terrestre	79
	La réflexion du rayonnement solaire	79
	L'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère : l'« anti-effet de serre »	80
	L'absorption du rayonnement tellurique par l'atmosphère : l'effet de serre	82
	Commentaire	83
■	L'effet de serre : un rôle de premier plan	84
	Effet de serre : l'analogie de la baignoire	84
	Vénus et l'effet de serre	84
■	Le jeu croisé des constituants de l'atmosphère et de la surface terrestre	88
	La réflexion du rayonnement solaire : les principaux acteurs	88
	L'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère : les acteurs de « l'anti-effet de serre »	89
	L'absorption de l'infrarouge tellurique par l'atmosphère : les acteurs de l'effet de serre	90
	Rôles multiples de certains composants	91
■	Le bilan radiatif	92
<b>CHAPITRE 9</b>	<b>L'équilibre énergétique</b>	93
■	Le bilan énergétique à la surface de la Terre dans le modèle à une couche	93
	L'approximation du modèle à une couche	93
	Le rôle de variable d'ajustement de la température de surface	94
■	Le bilan énergétique de la Terre à l'équilibre	95
	Les différentes pièces du puzzle	95
	Un bref résumé	96
■	Impact de l'activité humaine?	97
■	Un bilan global d'énergie déséquilibré	97
<b>CHAPITRE 10</b>	<b>Forçage climatique et rétroactions</b>	99
■	Forçage climatique	99
	Les processus internes	99
	Forçage externe et forçage radiatif	100
■	Les rétroactions	101
	Les rétroactions lentes	102
	Les rétroactions rapides	104
■	La sensibilité climatique	105
<b>CHAPITRE 11</b>	<b>La modélisation du climat</b>	105
■	Modèles de bilan énergétique et modèles radiatif-convectif	105
	Les modèles de bilan énergétique (EBMs)	106
	Les modèles radiatif-convectif (RCM)	107
■	Les modèles à trois dimensions de circulation générale atmosphérique (AGCMs)	107
	La structure d'un tel modèle	108
	Modèles météorologiques versus modèles climatiques	108
	Les modèles de circulation générale atmosphère-océan (AOGCMs)	109
■	Des modèles 3D de plus en plus complexes	109
■	Un modèle climatique, pour quoi faire?	111
	Résumé	

## PARTIE III

<b>Les différentes causes de l'évolution du climat</b> .....	113
<b>CHAPITRE 12</b> L'approche choisie.....	115
<b>CHAPITRE 13</b> L'émission du Soleil.....	117
■ Impact sur le climat : le mécanisme.....	117
■ Comment l'émission du Soleil a varié.....	117
Sur la décennie.....	117
Sur des décennies et des siècles.....	119
Sur les derniers millénaires.....	119
■ Quelles conséquences?.....	120
<b>CHAPITRE 14</b> La position de la Terre par rapport au Soleil.....	121
■ Impact sur le climat : aperçu général.....	121
■ Le flux d'énergie solaire reçu, fixé par les paramètres orbitaux.....	122
■ L'évolution de l'inclinaison : impact sur les saisons.....	122
■ L'évolution de l'orbite terrestre et de son excentricité : impact sur la distance Terre-Soleil ...	124
■ La précession de l'axe de rotation : l'impact sur la distance Terre-Soleil au cours des saisons.....	126
■ L'évolution du flux d'énergie solaire reçu.....	129
<b>CHAPITRE 15</b> La composition de l'atmosphère.....	131
■ Impact sur le climat : le mécanisme.....	131
■ Comment cette composition a varié, et pourquoi.....	131
Gaz à effet de serre et poussières.....	132
Aérosols volcaniques et vapeur d'eau.....	132
<i>Encadré</i> Les éruptions volcaniques.....	133
L'évolution récente.....	135
■ Quelles conséquences?.....	135
<b>CHAPITRE 16</b> Le transfert de chaleur de l'équateur vers les pôles.....	137
■ Impact sur le climat : le mécanisme.....	137
■ Comment et pourquoi ce transfert peut varier?.....	137
■ Quelles conséquences?.....	138
<b>CHAPITRE 17</b> Les oscillations résultant de l'interaction entre l'atmosphère et l'océan.....	139
■ Impact sur le climat : le mécanisme.....	139
■ L'« El Niño Southern Oscillation » (ENSO) et la fluctuation des alizés.....	140
■ L'Oscillation nord-atlantique et l'Oscillation arctique.....	144
L'Oscillation nord-atlantique.....	144
L'Oscillation arctique.....	145
<b>Résumé</b> .....	147

## PARTIE IV

### Les enseignements du passé

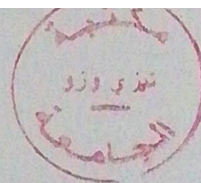
<b>CHAPITRE 18</b> Le souvenir du lointain passé	149
■ Sur les milliards d'années	151
■ Depuis des dizaines de millions d'années: un lent refroidissement	152
■ L'entrée en scène des glaciations de l'hémisphère nord	157
 <b>CHAPITRE 19</b> Depuis 2,6 millions d'années: la valse des glaciations	 161
■ L'enregistrement de cette valse	161
Archives océaniques: le message des isotopes et la nomenclature des différents stades climatiques	161
Archives glaciaires: isotopes et bulles d'air	163
<i>Encadré</i> Calottes, glaciers, banquise: de la glace partout, mais	163
<i>Encadré</i> Le forage de la calotte antarctique à Vostok	164
Archives continentales	166
■ Les cycles glaciaires-interglaciaires	168
Depuis 2,6 millions d'années: les différentes périodes impliquées	168
La durée des stades glaciaires et interglaciaires	169
Des transitions asymétriques	169
■ Glaciaires et interglaciaires: deux stades climatiques très contrastés	170
Stade glaciaire	170
Stade interglaciaire	172
L'écart de température entre glaciaire et interglaciaire	172
Changements dans la composition atmosphérique entre glaciaires et interglaciaires	173
■ Glaciaires comme interglaciaires: semblables mais jamais identiques	174
Les différents stades glaciaires	175
Les différents stades interglaciaires	175
■ Des changements climatiques «abrupts» lors du dernier cycle climatique	175
Climat chaotique et débâcles d'icebergs	178
La sortie de la dernière glaciation	179
<i>Encadré</i> Le coup de froid brutal du Dryas Récent	179
 <b>CHAPITRE 20</b> Cycles glaciaire-interglaciaire et la théorie de Milankovitch	 183
■ Le rôle leader de l'hémisphère nord	183
■ L'insolation saisonnière, paramètre clé des glaciations du Quaternaire	184
■ Les deux types de configuration	185
■ La lecture du climat des derniers 250 000 ans	186
La description des enregistrements passés	186
Mécanisme de l'établissement et du déroulement des phases chaudes	187
Mécanisme de l'établissement et du déroulement des phases glaciaires	189
■ Glaciaires et interglaciaires, des situations semblables mais jamais identiques	190
■ Le bilan d'énergie: forçage radiatif et rétroaction	191

<b>CHAPITRE 21</b>	<b>La valse des glaciations : conséquences et enseignements</b>	193
■	L'impact des alternances glaciaire-interglaciaire sur la vie	193
	L'évolution des habitats	193
	L'impact sur la biodiversité : les taxons, réfugiés climatiques	194
	Une succession de végétation semblable : l'établissement d'un « méta-équilibre »	195
■	Quelques enseignements	198
	Le poids du degré « moyen »	198
	L'inégalité entre les latitudes	198
	La différence entre continent et océan	199
	L'évolution des gaz à effet de serre	199
	Dans les interglaciaires précédents : le niveau marin était-il plus élevé que l'actuel?	200
■	À quand le retour de la prochaine glaciation?	200
	<i>Encadré</i> Un film apocalyptique : <i>Le Jour d'après</i>	201
<b>CHAPITRE 22</b>	<b>Depuis 12 000 ans, la période chaude de l'Holocène</b>	203
■	L'Holocène	203
■	Les trois grilles de lecture de l'évolution du climat durant l'Holocène	204
■	Sur plus de dix mille ans : la lente évolution de l'insolation (grille de lecture n°1)	204
■	Le lent refroidissement des hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord	205
■	Une mousson accrue au début de l'Holocène : l'épisode du « Sahara vert »	208
	Sur les trois continents	208
	L'épisode du « Sahara vert »	209
	Des phases de mousson accrue bien avant l'Holocène	212
	Mousson et cycles glaciaires	212
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ , un indicateur du cycle de l'eau aux tropiques	214
	L'impact d'un réchauffement futur sur le Sahara	215
■	Des clignotements du Soleil (grille de lecture n°2)	215
	Le Petit âge glaciaire au dernier millénaire	216
	Les néoglaciations de l'Holocène (grille de lecture n°2)	221
	Les phases chaudes des derniers millénaires	222
■	L'Holocène, naissance de l'agriculture et de l'élevage	223
	<i>Encadré</i> La théorie des émissions humaines de GES très précoces par Ruddiman	225
<b>CHAPITRE 23</b>	<b>Sur le siècle, des fluctuations mondiales et régionales</b>	227
■	Du global	228
	Les épisodes ENSO (El Niño et la Niña)	228
	Les éruptions volcaniques	230
	El Niño et l'activité volcanique, deux sources clés de la variabilité interannuelle	231
■	... au régional : l'exemple de l'Oscillation nord-atlantique	231
■	Le Soleil, une autre source de changement	232
<b>CHAPITRE 24</b>	<b>Le réchauffement futur à l'aune des climats passés</b>	233
■	Le coup de chaud d'il y a 55 millions d'années	233
■	Il y a trois millions d'années	235
■	Sur les deux derniers millions d'années, des périodes plus chaudes?	236
	<b>Résumé</b>	237

PARTIE V

# L'évolution récente du climat

<b>CHAPITRE 25</b> Le changement climatique récent	239
■ L'évolution de la température	241
Les changements observés	241
La mesure de la température moyenne: une précision invraisemblable?	241
Comment les différents compartiments de la Terre se réchauffent-ils?	246
■ L'évolution des précipitations, de la vapeur d'eau, des événements extrêmes: l'exemple du Sahel	246
L'évolution des précipitations	247
L'impact du réchauffement global sur les pluies du Sahel	248
L'évolution de la vapeur d'eau dans l'atmosphère	251
L'évolution des événements « extrêmes »	252
■ Une vue d'ensemble sur les dernières décennies	257
■ L'impact du réchauffement: une question primordiale	257
■ La banquise, le « canari » de la planète	259
La banquise	259
 <b>CHAPITRE 26</b> L'impact du réchauffement sur la cryosphère (neige et glace)	259
Pourquoi le retrait de la banquise arctique est-il si marquant?	260
L'évolution de la banquise arctique	260
Dans l'hémisphère sud, une évolution similaire?	261
■ L'évolution des glaciers	263
La relation glaciers/climat	263
L'évolution observée des glaciers	264
■ L'évolution des calottes glaciaires	267
■ L'évolution des sols gelés	271
Le pergélisol et les sols gelés	271
L'évolution récente	273
Les conséquences?	275
■ L'englacement et la couverture neigeuse	277
 <b>CHAPITRE 27</b> L'impact du réchauffement sur l'océan	277
■ L'évolution du niveau marin	278
Ce qui fait changer le niveau marin moyen	278
L'évolution observée	279
L'élévation du niveau des mers est-elle uniforme à la surface des océans?	283
■ L'évolution régionale de la salinité des océans	284
■ Un ralentissement de la circulation profonde?	284
■ L'évolution du CO <sub>2</sub> dissous et l'acidification des océans	285
L'évolution du CO <sub>2</sub> dissous	286
L'acidification de l'océan	287
<i>Encadré</i> Dans l'océan, l'horizon de saturation des carbonates	288
■ En résumé: une grande cohérence à l'échelle de la planète	288



<b>CHAPITRE 28</b> L'impact du réchauffement sur la biosphère .....	289
■ Les évolutions en cours .....	289
■ Dans les océans .....	290
Migrations en Atlantique nord .....	290
Blanchissement des coraux .....	290
Des épisodes de blanchissement d'ampleur planétaire .....	293
Acidification des eaux océaniques .....	295
■ Sur les continents .....	296
Réchauffement et migration .....	297
Plus chaud, plus tôt .....	299
La modification du développement et du cycle de vie .....	302
■ Les prémisses d'un dysfonctionnement .....	303
<b>CHAPITRE 29</b> Le réchauffement du XX <sup>e</sup> siècle : origine naturelle ou humaine? .....	305
■ Le cycle du carbone avant l'ère industrielle .....	306
Le rôle clé du carbone dans l'univers .....	306
Les réservoirs de carbone .....	306
<i>Encadré</i> L'importance du CO <sub>2</sub> sur Terre .....	308
Les échanges entre les réservoirs .....	309
Le cycle du carbone durant les époques glaciaires .....	311
Les variations des puits et sources du carbone d'une année à l'autre .....	311
■ L'impact des activités humaines sur le cycle du carbone .....	313
L'augmentation du CO <sub>2</sub> et du CH <sub>4</sub> dans l'atmosphère durant « l'Anthropocène » .....	313
Les modifications du cycle du carbone .....	316
La signature des émissions anthropiques .....	318
■ Les modifications liées à l'activité humaine .....	319
Les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine .....	319
Les autres modifications liées à l'activité humaine .....	321
■ Les causes naturelles : Soleil et volcans .....	322
L'activité solaire .....	322
L'activité volcanique .....	322
■ Synthèse des différentes causes : le rôle prépondérant de l'homme .....	323
Le forçage radiatif introduit par l'homme .....	323
Le réchauffement global au XX <sup>e</sup> siècle : origine naturelle <i>versus</i> anthropique .....	324
<i>Encadré</i> Le réchauffement global depuis 2000 jusqu'à 2010 : un ralentissement? .....	326
Le réchauffement lié à l'activité humaine est-il maintenant décelable? Si oui, depuis quand? .....	327
Résumé .....	329



# Le climat du XXI<sup>e</sup> siècle: les différents scénarios

<b>CHAPITRE 30</b> Deux facteurs clés .....	331
■ Les émissions de gaz à effet de serre .....	333
La place principale du CO <sub>2</sub> dans les gaz à effet de serre .....	333
Les émissions de CO <sub>2</sub> et la production mondiale d'énergie .....	333
Les émissions des différents pays .....	334
L'accumulation de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> dans l'atmosphère .....	335
■ La croissance démographique .....	336
<b>CHAPITRE 31</b> Les projections : scénarios économiques et modélisation climatique .....	339
■ Les différentes étapes dans la projection .....	339
■ Les modèles climatiques .....	341
<b>CHAPITRE 32</b> Les simulations : un aperçu général .....	343
■ Les scénarios sur le long terme .....	343
La stabilisation du climat : étape ultime des différents scénarios .....	343
Dans les prochains siècles .....	343
Sur plusieurs millénaires .....	345
■ Les scénarios du GIEC 2007 sur le XXI <sup>e</sup> siècle .....	346
Les différents scénarios .....	346
Modèles et scénarios .....	347
Le réchauffement moyen .....	347
■ Les scénarios du GIEC 2013 sur le XXI <sup>e</sup> siècle et leur évolution .....	349
La modélisation et les scénarios dans les GIEC 2007 et 2013 .....	349
L'évolution en cours (scénarios du GIEC 2021) .....	352
Scénarios .....	352
Le changement de la température moyenne globale et la relation avec la concentration en GES .....	354
<b>CHAPITRE 33</b> Le réchauffement futur et ses conséquences .....	357
■ Le réchauffement à l'échelle de la planète .....	357
■ Le cycle de l'eau et les précipitations .....	358
Cycle de l'eau et zones climatiques : un déplacement vers les pôles? .....	359
Précipitations .....	361
Humidité des sols et ruissellement .....	361
■ Les « événements extrêmes » .....	363
■ Neige et glaces .....	364
■ Le niveau marin .....	364
■ L'acidification de l'océan .....	366
■ Les projections climatiques : quel degré de confiance? .....	366



Les sources d'incertitudes sur la température moyenne globale .....	366
Des modèles à améliorer .....	366
Des scénarios économiques déjà dépassés? .....	367
Des seuils critiques et la possibilité d'événements climatiques «abrupts» .....	367
■ En résumé : le futur est déjà là .....	369
<b>CHAPITRE 34 Le choix</b> .....	<b>371</b>
■ Le réchauffement futur peut-il être contrecarré naturellement? .....	371
■ Quel scénario choisir? .....	372
L'impact sur la vie : un enjeu fondamental .....	372
L'impact sur les forêts .....	373
Impact sur la vie humaine : le stress thermique .....	374
Impact sur le cycle de l'eau : le stress hydrique .....	377
L'importance du changement climatique envisagé à l'aune des leçons du passé : la fin d'un méta-équilibre? .....	378
■ Un réchauffement moyen de + 2 °C : un objectif à ne pas dépasser .....	380
■ La relation « triple zéro » .....	381
<b>CHAPITRE 35 Le changement climatique dans l'état actuel de la planète</b> .....	<b>383</b>
■ Les dégradations environnementales .....	383
■ La raréfaction des ressources énergétiques? .....	384
■ L'inexorable croissance de la population mondiale? .....	384
■ L'avènement d'un nouveau type de développement? .....	385
Résumé .....	386
Conclusion .....	389
Bibliographie .....	393
Glossaire et abréviations .....	401
Index .....	411