An abstract painting with a complex, layered composition. The background is a dense mix of colors including reds, oranges, yellows, blues, greens, and greys. The brushstrokes are varied, with some being broad and sweeping, while others are more delicate and intricate. The overall effect is one of dynamic energy and visual richness.

L'HOMME PEUT-IL ACCEPTER SES LIMITES ?

Gilles Boeuf, Bernard Swynghedauw et Jean-François Toussaint, coord.

éditions
Quæ

L'HOMME PEUT-IL ACCEPTER SES LIMITES ?

Gilles Boeuf, Bernard Swynghedauw et Jean-François Toussaint, coord.

Préface de Ségolène Royal

éditions
Quæ

Les auteurs et les participants au colloque *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? Options futures et marges d'acceptation* remercient très chaleureusement le Collège de France pour son soutien sans faille pour l'organisation et la qualité des structures qui ont permis la parfaite tenue des débats du mois de mai 2014.

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles cedex
www.quae.com

© Éditions Quæ, 2017
eISBN : 978-2-7592-2697-9

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Sommaire

PRÉFACE

par Ségolène Royal..... 5

INTRODUCTION

par Gilles Boeuf, Bernard Swynghedauw et Jean-François Toussaint..... 7

1. LES ALERTES

Les enjeux du changement climatique

par Valérie Masson-Delmotte..... 14

Agriculture. S'adapter pour préserver les sols

par Daniel Nahon..... 29

Les multiples conséquences de la mobilité et des transports

par Bruno David..... 41

L'image écornée d'une mer à jamais recommencée

par Philippe Cury..... 52

L'humain dans la biodiversité

par Gilles Boeuf..... 66

2. LES OPTIONS POSSIBLES

Écomimétisme et solutions bio-inspirées appliqués aux éléments-traces métalliques

par Claude Grison..... 84

L'énergie photovoltaïque, un catalyseur de mutation

par Arnaud Chaperon..... 93

L'entreprise face aux défis de l'adaptation

par Gérard Mestrallet..... 107

De Malthus à Easterlin, ou de la nécessité pour l'homme de se comprendre afin de s'accepter

par Daniel Cohen..... 112

Les causes d'imprécision des prévisions démographiques à long terme

par Hervé Le Bras..... 115

3. ET L'HOMME DANS TOUT ÇA ?

Temps court, confiance et espérance : les options du politique

par Chantal Jouanno..... 128

Le refus des limites

par Jean-François Toussaint..... 136

Interactions entre culture et génétique dans l'évolution de l'homme par Evelyne Heyer	144
L'homme malade de lui-même par Bernard Swynghedauw	151
La biologie de l'attachement par Boris Cyrulnik	157
Mythes et réalités de la plasticité cognitive et cérébrale par Lionel Naccache	163

4. LES PERSPECTIVES

Le temps long : les critères anthropologiques par Yves Coppens	172
Les défis conceptuels de l'Anthropocène par Philippe Descola	178
Les tortues nous donnent des leçons par Hubert Reeves	187

CONCLUSION par Jean-François Toussaint, Bernard Swynghedauw, Gilles Boeuf	189
---	-----

FIGURES ET SCHÉMAS COMPLÉMENTAIRES

Préface

Mesdames et Messieurs,

J'ai tenu à saluer les travaux de ce colloque dont j'avais ouvert les débats et qui s'inscrit dans une réflexion au long cours ponctuée de rendez-vous désormais réguliers : le parti-pris extraordinaire de ces rencontres est de croiser les regards et les apports de toutes les disciplines pour traiter d'un sujet et d'enjeux éminemment transversaux.

J'y vois le souci de ne pas dissocier les différentes dimensions de la question écologique et de ne pas dépecer le monde en catégories impuissantes à rendre compte d'une complexité où, comme le suggère l'étymologie, tout est tissé ensemble et tout se tient : le biologique, l'économique, le social et l'éthique.

C'est bien dans la manière du Collège de France où l'on ne s'en tient pas à la solitude altièrre des frontières disciplinaires et dont la mission est de mettre à la disposition de tous, sans que la barrière de l'argent ou d'une inscription y fasse obstacle, le meilleur des connaissances d'aujourd'hui qui nous aident à penser et comprendre le monde.

J'ai toujours été convaincue que, pour agir juste, il faut se nourrir des réflexions des chercheurs, accepter au besoin qu'ils bousculent nos certitudes car c'est ainsi que s'enrichit une vision du monde, s'aiguise une perception du temps présent et se libère l'imagination que je crois nécessaire à l'action publique.

Face à la contradiction entre les temps, le temps court et le temps long, je m'efforce d'inscrire mon action dans le temps long, notamment avec les enjeux dont j'ai la charge. D'abord, la défense de la biodiversité, en particulier avec la loi de reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, que j'ai portée devant le Parlement, et les actions qui l'accompagnent, pour permettre une meilleure harmonie entre la nature et les humains. La transition écologique et énergétique, également, que j'ai engagée (avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte) et qui concerne un enjeu majeur pour notre place sur la planète.

Je crois venu le temps d'une réconciliation de l'humanité avec son environnement, c'est tout le défi que vos travaux ont remarquablement souligné. Environnement que je prends ici au sens que lui donne Philippe Descola : « ce qui relie et constitue les humains comme expressions multiples d'un ensemble qui les dépasse ».

Car la mutation que nous devons accomplir dans nos façons de penser et de faire ne doit pas être une contrainte subie mais une chance empoignée

à pleines mains pour faire advenir un nouveau modèle de développement et de progrès humain.

[...] Ayant pu suivre le début de ce colloque, à l'invitation de l'administrateur du Collège de France, Serge Haroche, du vice-président de l'Assemblée de professeurs et de Gilles Bœuf, professeur titulaire de la chaire *Développement durable, environnement, énergie et société*, qui a présidé également aux destinées du Muséum national d'histoire naturelle, je tenais également à remercier Hubert Reeves, devenu depuis le président d'honneur de l'Agence française pour la biodiversité, Valérie Masson-Delmotte, Jean-François Toussaint, Yves Coppens et Boris Cyrulnik ainsi que tous les chercheurs, pardon de ne pas pouvoir les citer tous, qui ont contribué à cet ouvrage.

Ségolène Royal

Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer de 2014 à 2017

D'après le discours qu'elle a prononcé lors du colloque *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? Options futures et marges d'acceptation*, au Collège de France, en 2014.

Introduction

Gilles Boeuf, Bernard Swynghedauw et Jean-François Toussaint

Nous avons organisé au Muséum national d'histoire naturelle, au Jardin des plantes à Paris, les 29 et 30 octobre 2010, un colloque intitulé *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?* Vingt-sept orateurs et auteurs avaient à l'époque pris part aux sessions et nous avaient fourni les chapitres recueillis dans l'ouvrage paru chez Quæ à l'automne 2012, sous le titre *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?* [1]. Nous étions alors durant l'année internationale dédiée à la biodiversité et de multiples conférences avaient eu lieu de par le monde, dont en France celle des Nations Unies, à l'Unesco à Paris les 25 et 26 janvier, et celle de Chamonix du 10 au 12 mai, intitulée *Quelle gouvernance pour réussir ensemble ?* Les travaux de la première confortaient les opinions quant à la gravité de la situation concernant la biodiversité et le second colloque concluait sur l'urgence à réussir ce que nous n'avions pas été capables d'atteindre avant 2010 (que nous nous étions pourtant promis au Sommet de la Terre de Johannesburg, en 2002 !), c'est-à-dire freiner, voire stopper, l'érosion de la biodiversité. Il était alors décidé de dédier la décennie 2010-2020 à son sauvetage.

Mais en fait, quand allons-nous réussir ? La situation n'arrête pas d'empirer même si de notables réussites sont à mentionner, comme la réduction du trou dans la couche d'ozone [2], la prise de conscience de la pollution de l'océan et l'interdiction récente de l'usage des sacs en plastique, l'extension importante d'aires marines protégées après la conférence *Our ocean* du 15 septembre 2016 à Washington, l'interdiction de l'usage de pesticides... Près de quatre années s'étaient écoulées après 2010 quand nous avons récidivé avec un nouveau colloque, *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? Options futures et marges d'acceptation*, organisé cette fois-ci au Collège de France, les 22 et 23 mai 2014, alors que l'un d'entre nous, Gilles Boeuf, avait été élu comme professeur invité sur la chaire annuelle « Développement durable, énergie, environnement et société »¹. Dix-neuf des orateurs ont également accepté de donner un texte écrit, augmenté des données actuelles, que nous vous délivrons ici sous l'intitulé général *L'homme peut-il accepter ses limites ?*.

Les travaux récents publiés dans de très nombreuses revues, dont *Nature* et *Science*, sont éloquentes : la situation ne s'améliore pas ! À la destruction systématique des écosystèmes (forêts tropicales, littoral, mares et zones humides, cours d'eau...), remplacés notamment par des surfaces agricoles monospécifiques ou par des surfaces artificialisées suite à l'explosion de la superficie des villes, à la pollution, partout, même là où l'humain n'est pas (Arctique et Antarctique), au désastre des micro-plastiques dans l'océan [3], à la dissémination d'espèces vivantes partout sur la planète

1. Les conférences sont disponibles, en vidéo et en audio, sur le site du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/site/gilles-boeuf/symposium-2014-05-22-09h00.htm>).

(la « roulette écologique »²), amenant à des désordres liés aux espèces invasives et à la « libre circulation » des pathogènes, à la surexploitation des stocks (pêche [4] et utilisation de la forêt tropicale [5, 6, 7]), s'ajoutent aujourd'hui, de plus en plus détectables, les retombées du changement climatique [8]. Ceci a été bien mis en évidence lors des travaux de la COP21 à Paris en décembre 2015, puis durant la COP22 à Marrakech en novembre 2016³, où 195 États ont décidé d'unir leurs efforts pour tenter de contenir le réchauffement en dessous de 2 °C, voire 1,5 °C, à l'échéance de 2100. La présidente de la COP21, Ségolène Royal, a pu préciser le 4 novembre 2016 que la ratification de l'accord de Paris par au moins 55 pays, représentant 55 % des émissions de gaz à effet de serre, était effective. En fait, le meilleur révélateur du changement, c'est bien le vivant, comme en témoignent l'avancée, partout, des dates de récoltes et de vendanges et les modifications spectaculaires des aires de répartition d'espèces tant marines que continentales. Les effets du changement climatique viennent se surimposer aux raisons précédemment énumérées de la dégradation de l'environnement, et ceci a des conséquences pour toutes les espèces vivantes, y compris bien sûr pour l'humain et toutes ses activités économiques. À tout ceci se rajoute la démographie de l'humanité : la population humaine a triplé entre 1945 et aujourd'hui !

Telles étaient les raisons de la tenue de ces colloques de 2010 et de 2014. Pour aborder ces questions, il nous fallait réunir un groupe de scientifiques indiscutables sur le même lieu et au même moment, ce qui n'est jamais très simple. Dix d'entre eux sont quand même parvenus à assister aux deux événements. Nous avons organisé le colloque de 2014 sur deux journées, la première dédiée aux capacités humaines d'adaptation et aux systèmes d'alerte, la seconde aux conditions d'acceptation. Ceci est retranscrit ici en trois parties, à savoir « Les alertes », « Les options possibles », « Et l'homme dans tout ça ? », suivies d'une partie traitant des perspectives.

Le constat actuel, malgré tous nos efforts (insuffisants), est assez consternant ; Edgar Morin disait en 2010 [9] : « [...] le vaisseau spatial Terre est emporté par un quadrimoteur, la science, la technique, l'économie et le profit. Et chacun de ces moteurs est profondément ambivalent. Le probable est catastrophique, il est que nous allons vers l'abîme ! ». Et il rajoutait : « [...] pourtant, il y a toujours eu de l'improbable dans l'histoire humaine, le futur n'est jamais joué [...] ». Tout est bien là : allons-nous être capables de réagir à temps ? Il nous faut effectuer une réelle métamorphose, acquérir une conscience humanitaire planétaire ! Faisons tout pour que ce probable promis ne se réalise pas !

L'humain n'influence directement le cours de l'évolution sur Terre que depuis très récemment, ce qui a amené à proposer le terme

2. Expression traduisant le fait que les conséquences des disséminations soient imprévisibles.

3. Respectivement 21^e et 22^e conférences des parties, prévues par la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

d'Anthropocène pour désigner cette période dans laquelle les activités humaines laissent désormais une extraordinaire empreinte sur l'ensemble de la planète. Aujourd'hui, les ressources naturelles, tant les minérales (les métaux rares, par exemple), non renouvelables, que les vivantes, pourtant bien renouvelables mais que nous surexploitions et pour lesquelles nous dépassons donc chaque année les seuils de « renouvelabilité », s'épuisent [10]. Pollution et destruction sont partout, dans les sols [11], les rivières [12], l'océan [3, 13], l'air [14]... La forêt tropicale disparaît [5, 6, 7] à un rythme ahurissant (la surface de l'Angleterre par année !). L'océan se vide de ses occupants [4, 15], se contamine [3, 13] et s'acidifie [16, 17] ; le niveau de la mer monte vite [18, 19, 20]. Et face à ce climat qui change (il a toujours changé, et heureusement pour la biodiversité, mais il change trop vite aujourd'hui), les espèces ne parviennent pas à s'adapter [21] et la biodiversité s'effondre [8, 22]. L'influence de l'humain sur l'occurrence, la fréquence et la puissance des cyclones tropicaux s'exerce au travers des émissions de CO₂ [23] et son empreinte s'intensifie considérablement depuis une trentaine d'années [24]. Réfléchissons bien à notre besoin impératif de biodiversité, en nous, avec nous, autour de nous... Nos écosystèmes sont-ils aujourd'hui suffisamment structurés pour répondre au changement global ? Toutes ces questions ne sont pas que des préoccupations de « doux » poètes, de rêveurs écologistes ; elles sont centrales dans l'évolution géopolitique des sociétés humaines, le changement climatique se traduisant déjà par des crises et des conflits [25, 26, 27].

Tout ceci réintroduit des questions techniques et philosophiques sur la notion de progrès, de bien-être, d'envie partagée, de maison commune... Il faudra bien l'effort de tous pour empêcher ce probable promis... Claude Lévi-Strauss [28] écrivait en 2005 : « [...] si l'humain possède d'abord des droits au titre d'être vivant, il en résulte que ces droits, reconnus à l'humanité en tant qu'espèce, rencontrent leurs limites naturelles dans les droits des autres espèces [...] ». Nous ne sommes pas tout seuls sur la Terre et, de plus, nous sommes bien récemment apparus ! Notre économie et notre santé dépendent, directement ou indirectement, d'une biodiversité maintenue et d'un environnement en « bonne santé » ! Il n'y aura pas d'agriculture durable sans respect des données écologiques, pas de santé durable autrement que basée sur l'écologie. Il nous faut trouver un nouveau système économique, beaucoup plus soutenable, basé sur des énergies renouvelables, décarbonées⁴, et ne consistant pas à faire du profit en détruisant la nature ou en la surexploitant. Il nous faut trouver un nouveau système social, beaucoup plus partageur, non centré sur une mince couche de la population [29].

4. Une énergie décarbonée est une énergie dont la production et la consommation ne génèrent pratiquement pas de CO₂.

Les analyses qui font le corps de cet ouvrage ont été rédigées par des penseurs et des scientifiques d'origine très diverse. Puissent-elles nous inciter à une réflexion collective, dont la base est la nécessité que nous avons de nous adapter. Ceci sous-entend que nous acceptons, collectivement, de changer et en particulier de changer nos comportements !

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) Toussaint J.-F., Swynghedauw B., Boeuf G., 2012. *L'homme peut-il s'adapter à lui-même ?*, Quæ, Versailles, 188 p.
- (2) Solomon S. *et al.*, 2016. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269-274.
- (3) Cressey D., 2016. The plastic ocean. *Nature*, 536, 263-265.
- (4) Pauly D., Zeller D., 2016. Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communication*, DOI: 10.1038, 9 p.
- (5) Gibson L. *et al.*, 2011. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. *Nature*, 478, 378-383.
- (6) Barlow J. *et al.*, 2016. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 535, 144-147.
- (7) Edwards D.P., 2016. The rainforest's "do not disturb" signs. *Nature*, 535, 44-45.
- (8) Urban M.C. *et al.*, 2016. Improving the forecast for biodiversity under climate change. *Science*, 353(6304), 10 p.
- (9) Morin E., Viveret P., 2010. *Comment vivre en temps de crise ?*, Bayard, 91 p.
- (10) Steffen W. *et al.*, 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 736-746.
- (11) Wall D. *et al.*, 2015. Soil biodiversity and human health. *Nature*, 528, 69-76.
- (12) Vörösmarty C.J. *et al.*, 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555-561.
- (13) Lönnsted O.M., Eklöv P., 2016. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology. *Science*, 352(6290), 1213-1216.
- (14) Lelieveld J. *et al.*, 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 525, 367-371.
- (15) Payne J.L. *et al.*, 2016. Ecological selectivity of the emerging mass extinction in the oceans. *Science*, 353(3605), 1284-1286.
- (16) Dupont S., Pörtner H., 2013. Get ready for ocean acidification. *Nature*, 498, 429.
- (17) Albright R. *et al.*, 2016. Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification. *Nature*, 531, 362-365.
- (18) Kirwan M.L., Megonigal J.P., 2013. Tidal wetland stability in the face of human impact and sea-level rise. *Nature*, 504, 53-60.
- (19) Golledge N.R. *et al.*, 2015. The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature*, 526, 421-425.
- (20) DeConto R.M., Pollard D., 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591-597.
- (21) Bertrand R. *et al.*, 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature*, 479, 517-529.
- (22) Oliver T.H., 2016. How much biodiversity loss is too much? *Science*, 353(6296), 220-221.
- (23) Sobel A.H. *et al.*, 2016. Human influence on tropical cyclone intensity. *Science*, 353(6296), 242-246.
- (24) McGowan P.J.K., 2016. Mapping the terrestrial human footprint. *Nature*, 537, 172-173.
- (25) Hsiang S.M. *et al.*, 2011. Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature*, 476, 7361.
- (26) Kelley C.P. *et al.*, 2015. Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent

Syrian drought. *PNAS*, 112(23), 3241-3246.

(27) Carleton T.A., Hsiang S.M., 2016. Social and economic impacts of climate. *Science*, 353(6304), 15 p.

(28) Lévi-Strauss C., 2005. L'ethnologue devant les identités nationales. Discours à l'Académie française, 13 mai 2005.

(29) Nekola J.C. *et al.*, 2013. The Malthusian-Darwinian dynamic and the trajectory of civilization. *Trends in Ecology and Evolution*, 28(3), 127-130.

1.



LES ALERTES

Les enjeux du changement climatique

Valérie Masson-Delmotte*

*Directrice de recherche
au CEA, laboratoire des
Sciences du climat et de
l'environnement (CEA-
CNRS-UVSQ), Institut
Pierre Simon Laplace,
Gif-sur-Yvette

Depuis une cinquantaine d'années, la connaissance et la compréhension des changements climatiques passés a évolué spectaculairement [1], à travers une double approche de reconstitution et de modélisation [2]. Des méthodes de prélèvement et de forage permettent d'extraire des archives naturelles du climat, accumulées au fil du temps dans tous les milieux, comme les sédiments des lacs ou des océans, les concrétions des grottes, les cernes des arbres ou les glaciers. Les analyses biologiques, géochimiques ou physiques de ces échantillons sont ensuite exploitées pour les dater et pour en extraire des informations quantitatives sur des variables climatiques locales, comme la température de l'air ou de l'eau ou l'abondance des précipitations, mais aussi sur la salinité de l'eau de mer, le niveau moyen des mers ou la composition atmosphérique. La relation entre les paramètres mesurés dans ces archives et les variables climatiques repose sur des analyses statistiques ou sur des modèles de processus établis pour le climat actuel. L'intégration de différents enregistrements paléo-climatiques permet de caractériser les changements de température de surface à grande échelle (continentale, hémisphérique, globale) ainsi que les modifications de la circulation océanique, comme la circulation méridienne de l'Océan atlantique, et celles de la circulation atmosphérique, *via*, par exemple, les déplacements de la position de la zone de convergence intertropicale qui modifient la répartition des précipitations [3].

Ces informations rétrospectives complètent la surveillance du climat par les grands réseaux de mesures météorologiques et océanographiques et par l'observation spatiale. Ainsi l'évolution du climat est-elle de mieux en mieux caractérisée, depuis le milieu du XIX^e siècle, dans toutes ses facettes. Le système climatique est extraordinairement complexe, et fait intervenir à la fois des processus se déroulant à une très petite échelle, temporelle ou spatiale, comme les interactions entre les particules atmosphériques et les échanges de rayonnement, et des processus de très grande échelle, comme la circulation océanique globale ou l'écoulement des grandes calottes de glace polaires. Le climat va donc réagir à toute perturbation du bilan radiatif de la Terre, avec des mécanismes de rétroactions amplificatrices et stabilisatrices qui vont modifier son bilan énergétique ainsi que les circulations de l'atmosphère et de l'océan (figure 1.1). Par la complexité des interactions entre les différentes composantes du système

climatique que sont l'atmosphère, l'océan, la cryosphère⁵ et les surfaces continentales, ce système génère aussi sa propre variabilité, intrinsèque. Comprendre le fonctionnement du climat demande d'évaluer la part de son évolution qui est une réponse déterministe à des perturbations, et pour cela de quantifier ses rétroactions, ainsi que de caractériser sa variabilité intrinsèque.

Comme il n'est pas possible de faire une « maquette » de ce système climatique pour l'étudier en laboratoire, le développement de modèles de climat joue un rôle déterminant dans la compréhension de son fonctionnement [4]. L'étude des climats passés mobilise des modèles conceptuels, théoriques, mais aussi l'utilisation de modèles numériques, dits « de circulation générale », qui décrivent en trois dimensions l'atmosphère (dont le cycle de l'eau atmosphérique) et l'océan ainsi que leurs interactions avec les éléments de la cryosphère qui réagissent rapidement (glace de mer, neige) et la surface des continents. Ils intègrent une représentation de la chimie atmosphérique et du cycle du carbone. Ces modèles de climat, mis au point pour le climat actuel, sont les seuls outils permettant d'évaluer les risques climatiques futurs. S'ils reposent sur des lois physiques, ces modèles numériques intègrent également des paramétrisations semi-empiriques pour les processus d'échelle plus petite que la maille sur laquelle sont faits les calculs et qui a, pour l'atmosphère, une résolution horizontale de dizaines de kilomètres. Ces paramétrisations sont mises au point par rapport à des études de processus du climat actuel et sont une source de dispersion entre les résultats de différents modèles, et d'incertitude. Pour la partie atmosphérique, les modèles de climat sont étroitement liés aux modèles atmosphériques utilisés pour la prévision météorologique.

Ces modèles de climat sont utilisés pour comprendre la réponse du climat à différentes perturbations et pour évaluer le rôle de facteurs naturels (variabilité interne au climat, variation de l'activité solaire ou volcanique) ou l'influence humaine sur le climat (rejets de différents types de gaz à effet de serre et de particules polluantes, changements d'usage des sols, déforestation, etc.) au cours du dernier siècle. Ils sont également utilisés pour explorer les causes et les mécanismes des changements climatiques passés, à différentes échelles de temps de l'histoire de la Terre, depuis les grands changements géologiques jusqu'aux variations glaciaires et interglaciaires, pour finir avec les fluctuations subtiles des derniers mille ans. Les données caractérisant ces climats passés permettent en retour de tester la capacité des modèles numériques à représenter les grands traits des changements climatiques passés [5] (figure 1.1).

5. La cryosphère désigne l'ensemble des océans et des régions à la surface, ou sous la surface, de la Terre où l'eau est présente sous forme solide, ce qui inclut la glace de mer, de lac ou de rivière, le manteau neigeux, les glaciers et calottes, ainsi que les sols gelés de manière saisonnière ou permanente (le pergélisol) des régions de montagne ou polaires.

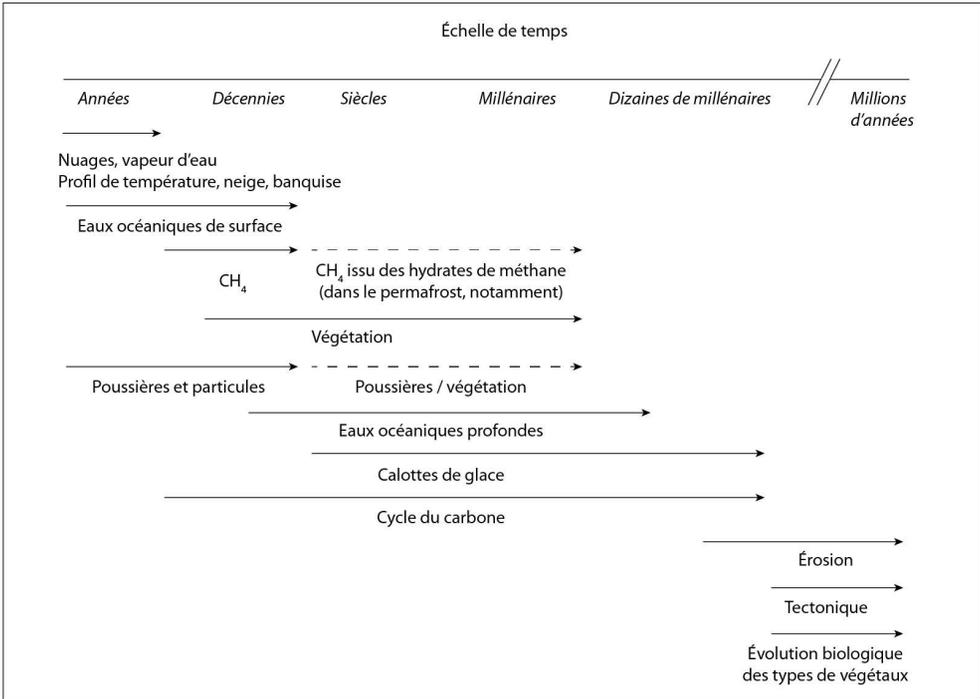


Figure 1.1. Échelles de temps auxquelles les différents compartiments du système climatique répondent, selon des rétroactions internes, à toute perturbation externe du bilan radiatif de la Terre (adapté de (6)).

L'histoire du climat

Depuis 200 000 ans, notre espèce, *Homo sapiens*, a fait la preuve de sa capacité d'adaptation à de grandes variations climatiques. Son émergence se produit lors de l'avant-dernière période glaciaire, et l'homme a donc connu l'alternance de deux périodes glaciaires, d'environ 5° C plus froides que le climat actuel en moyenne à la surface de la Terre, et des deux dernières périodes interglaciaires, l'une atteignant son maximum il y a environ 125 000 ans et l'autre ayant débuté il y a 12 000 ans environ (figure 1.2, planche I). Ces grandes variations, d'une période glaciaire à une période interglaciaire, sont dues aux variations lentes des caractéristiques de l'orbite de la Terre autour du soleil, ainsi qu'à celles de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre, qui modulent la répartition de l'ensoleillement selon les saisons et les latitudes. Ainsi, le démarrage d'une glaciation est associé à une accumulation d'enneigement, possible lorsque l'ensoleillement d'été des hautes latitudes de l'hémisphère Nord est suffisamment réduit pour ne pas provoquer la fonte de tout l'enneigement hivernal. L'intensité des glaciations est cependant le résultat d'une superposition de rétroactions qui amplifient l'effet saisonnier et local des variations de l'ensoleillement. En particulier, deux phénomènes modifient fortement le bilan radiatif global de la Terre : l'extension des grandes calottes de glace qui couvraient le Nord de l'Amérique et de l'Eurasie, qui modifie l'albédo de la Terre et donc la fraction de l'ensoleillement réfléchi, et les variations de la teneur en gaz à effet de serre (dioxyde de carbone et méthane), du fait d'une

augmentation du stockage de dioxyde de carbone dans l'océan glaciaire et d'une diminution des émissions de méthane par les zones humides dans un climat glaciaire, plus froid et plus sec.

Le climat le plus chaud que notre espèce ait connu fut celui de la dernière période interglaciaire, il y a 130 000 à 115 000 ans, marqué par des températures moyennes plus élevées que celles des derniers siècles près des pôles, ainsi que par des moussons d'été plus intenses dans l'hémisphère Nord et des températures plus basses dans les régions tropicales. Ces caractéristiques sont dues à la réponse du climat aux changements de répartition de l'ensoleillement, car la composition atmosphérique était comparable au niveau pré-industriel (avant 1800). Lors de cette période, la température moyenne globale était de 1 à 2 °C au-dessus de celle des derniers siècles. Le niveau marin était de 5 m au-dessus du niveau actuel, témoignant d'une déglaciation d'une partie du Groenland et peut-être de certains secteurs de l'Antarctique. À la fin de cette période, on estime que la population humaine était d'environ 500 000 personnes.

À l'inverse, le climat le plus froid que l'homme ait connu est donc le climat du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, marqué par un refroidissement moyen de l'ordre de 5 °C par rapport à la température moyenne de la Terre au cours des derniers siècles. Ce refroidissement a été modeste (de 2 à 3 °C) dans les régions tropicales, plus prononcé au-dessus des continents que des océans, et il a été particulièrement intense dans les régions polaires (typiquement, des températures inférieures de 10 °C en Antarctique, de 15 °C en Europe, à proximité d'une grande calotte de glace, et de plus de 20 °C au Groenland, par rapport à celles des derniers siècles). Le niveau des mers était 130 m en dessous du niveau actuel (comme en témoigne l'accès à la grotte Cosquer, qui est aujourd'hui sous-marin), du fait du stockage d'eau dans les gigantesques calottes de glace au nord de l'Amérique et de l'Eurasie. Outre les variations lentes du climat, dues aux variations des caractéristiques de l'orbite terrestre, le climat des périodes glaciaires a été ponctué d'instabilités très rapides, en quelques décennies à quelques siècles, associées à des réorganisations de la circulation de l'Océan atlantique, provoquant des changements de température en opposition de phase dans les deux hémisphères, ainsi que des changements de circulation atmosphérique et de répartition des pluies à toutes les latitudes. Certaines de ces variations rapides se sont donc produites en l'espace d'une génération humaine et ont eu des impacts majeurs sur les écosystèmes terrestres et sur les populations de chasseurs-cueilleurs nomades qui en dépendaient. La fin de cette glaciation s'est produite sur environ 10 000 ans, avec un rythme moyen de réchauffement de l'ordre de 1 °C par millénaire et une montée du niveau des mers au rythme moyen de 10 à 15 cm par siècle, pouvant atteindre jusqu'à 40 cm par siècle lors de débâcles rapides des calottes de glace.

La dernière déglaciation a ainsi laissé place à la période interglaciaire actuelle, l'Holocène, depuis 12 000 ans. Durant cette ère, le niveau des mers

a continué d'abord à augmenter, plus lentement que pendant la fin de l'ère glaciaire précédente, suite à la fin de la déglaciation de la calotte de glace qui couvrait l'Amérique du Nord et de certains secteurs de l'Antarctique. Ensuite, au cours des 3 000 ans précédant la période industrielle, le niveau des mers a été relativement stable. Suite aux variations lentes des paramètres de l'orbite terrestre, les changements d'ensoleillement ont provoqué une diminution graduelle de la température d'été de l'hémisphère Nord, de l'ordre de quelques degrés, au cours des derniers 8 000 ans. En moyenne annuelle, et pour l'ensemble de la surface de la Terre, on estime que la température a diminué d'environ 0,7 °C entre le début de l'Holocène et le XIX^e siècle. Les changements d'ensoleillement ont également été à l'origine de moussons plus intenses, dans la première moitié de l'Holocène, en particulier en Afrique du Nord, y laissant les vestiges d'un Sahara vert. Ces conditions climatiques relativement stables ont fourni un contexte favorable à la révolution néolithique, avec les émergences parallèles et complexes d'activités agricoles dans différentes régions. Les vestiges les plus anciens de la domestication des plantes et des animaux d'élevage se trouvent dans le Croissant fertile du Moyen-Orient, il y a environ 12 000 ans. Au cours des six millénaires suivants, la population mondiale a fortement augmenté et a pu atteindre 5 à 20 millions de personnes il y a 6 000 ans.

À plus court terme, la variabilité du climat est également marquée par sa réponse aux éruptions volcaniques explosives et aux minima d'activité solaire, et par sa variabilité intrinsèque. Ces variations sont mieux connues pour le dernier millénaire, notamment pour l'hémisphère Nord, grâce à des archives à l'échelle d'une année, voire d'une saison, et aux informations historiques (figure 1.3, planche II). Entre les années 850 et 1900, les variations de la température moyenne à la surface de l'hémisphère Nord ont été faibles, probablement inférieures à 1 °C (figure 1.3D, planche II). Dans de nombreuses régions, cependant, des variations hydro-climatiques importantes ont pu se manifester, comme de fortes sécheresses ou des modifications des fréquences d'inondations, qui ont affecté les sociétés humaines alors présentes [9, 10]. Ces informations paléo-climatiques caractérisent la gamme de variabilité « naturelle » du climat, pour une orbite terrestre donnée, et complètent les informations disponibles depuis le début des mesures météorologiques afin de mieux caractériser les variations décennales ou séculaires et le retour d'événements rares (crue du siècle, tempête du siècle, etc.), ou de mieux planifier la gestion de l'eau.

Les changements en cours

En 1750, la population mondiale compte 750 millions de personnes. Elle atteint 2 milliards en 1950, et 7,5 milliards aujourd'hui. Les révolutions énergétiques, industrielles, agricoles et médicales qui s'amorcent à la fin du XVIII^e siècle bouleversent les modes de production et de consommation, améliorent les conditions de vie et permettent cette incroyable augmentation de la population humaine. En parallèle, les activités humaines, à