

Augustin Fragnière
Jacopo Grazioli
Samuel Jaccard
Christophe Randin
Philippe Thalmann



Le changement climatique

Climat, écologie, société
et politique

EPFL PRESS

Le changement climatique

Climat, écologie, société et politique

Augustin Fragnière, Jacopo Grazioli, Samuel Jaccard,
Christophe Randin, Philippe Thalmann

Où que l'on regarde, les effets du changement climatique se manifestent. La compréhension de ce phénomène et de ses enjeux est désormais essentielle pour toute personne, qu'elle soit étudiante, engagée dans la société ou simplement intéressée par cette question. Ce livre se donne comme objectif d'expliquer à chacun et chacune, de manière simple, claire et accessible, les fondements du changement climatique, sur la base des connaissances scientifiques les plus récentes et à l'échelle mondiale comme à celle de la Suisse. Il expose de façon synthétique les grandes problématiques du sujet, qu'il s'agisse du système climatique terrestre et de son bilan énergétique, des modélisations et des projections, ou de l'impact du phénomène sur les écosystèmes et les sociétés humaines. Il aborde ensuite les enjeux de justice sociale, de gouvernance et d'économie, et présente enfin les stratégies de lutte contre le changement climatique.

Les auteurs, Augustin Fragnière, Jacopo Grazioli, Samuel Jaccard, Christophe Randin et Philippe Thalmann, dispensent depuis de nombreuses années un enseignement universitaire sur les enjeux mondiaux du changement climatique, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne et à l'Université de Lausanne.

ISBN 978-2-88915-694-8



9 782889 156948 >

EPFL PRESS

Le changement climatique

Augustin Fragnière
Jacopo Grazoli
Samuel Jaccard
Christophe Randin
Philippe Thalmann

Le changement climatique

Climat, écologie, société
et politique

EPFL PRESS

Direction générale : Lucas Giossi
Directions éditoriale et commerciale : Sylvain Collette et May Yang
Responsable de production : Christophe Borlat
Éditorial : Alice Micheau-Thiébaud et Jean Rime
Graphisme : Kim Nanette et Anne Kummli
Promotion et diffusion : Manon Reber
Comptabilité : Daniela Castan

EPFL PRESS est une maison d'édition de la fondation des Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR), qui publient principalement les travaux d'enseignement et de recherche de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), des universités et des hautes écoles.

PPUR, EPFL – Rolex Learning Center,
Station 20, CH-1015 Lausanne,
info@epflpress.org
tél. : +41 21 693 21 30

www.epflpress.org

Première édition, 2025
ISBN 978-2-88915-694-8, version imprimée
ISBN 978-2-8323-2339-7, version ebook (PDF), doi.org/10.55430/0548LCCAF

Ce livre est sous licence :



Le texte est sous licence Creative Commons : elle vous oblige, si vous utilisez cet écrit, à en citer l'auteur, la source et l'éditeur original, sans modification du texte ou de l'extrait et sans utilisation commerciale.

Table des matières

Listes des figures, tableaux et encadrés	7
Abréviations	11
Introduction	13

PARTIE 1 Les bases scientifiques

Jacopo Grazioli et Samuel Jaccard

1. Le système climatique	19
1.1 Composition et interconnexions du système climatique	19
1.2 Observation du système climatique	24
2. Bilan énergétique du système climatique et sa perturbation par les humains	29
2.1 Le bilan énergétique de la Terre et ses facteurs de forçage	30
2.2 Perturbations anthropiques des concentrations atmosphériques de GES	34
2.3 Le paléoclimat	41
3. Modèles, incertitudes, projections	43
3.1 Concepts de base	43
3.2 Incertitudes et prévisions	46
3.3 Impacts physico-chimiques du changement climatique	50

PARTIE 2 Impact du changement climatique sur les écosystèmes

Christophe Randin

4. Changement climatique et autres composantes des changements globaux	57
4.1 Les écosystèmes	58
4.2 Changement climatique, changements globaux et changements des écosystèmes	61
5. Relations entre climat et organismes	67
5.1 Le concept de la niche écologique des espèces	69
5.2 Réactions des organismes face au changement climatique	72
6. Impacts du changement climatique sur les écosystèmes à l'échelle globale	79
6.1 Impacts des phénomènes climatiques extrêmes sur les organismes et les écosystèmes	81
6.2 Impacts du changement climatique sur les grands écosystèmes	84
6.3 Impacts du changement climatique en Suisse	89

PARTIE 3 Impacts sociaux, justice et gouvernance climatique mondiale

Augustin Fragnière

7.	Conséquences du changement climatique sur les sociétés humaines	99
7.1	Impacts observés	99
7.2	Risques climatiques	107
8.	Questions de justice climatique	117
8.1	La notion de justice	117
8.2	Justice climatique distributive	121
8.3	Justice procédurale dans la gouvernance du changement climatique	132
8.4	Justice comme reconnaissance dans les politiques climatiques	134
9.	Gouvernance mondiale et obstacles à l'action climatique	137
9.1	Pourquoi a-t-on besoin d'une gouvernance mondiale?	137
9.2	Les institutions de la gouvernance mondiale	141
9.3.	Obstacles à une action climatique à la hauteur des enjeux	147

PARTIE 4 Les instruments de la politique climatique, notamment de la Suisse

Philippe Thalmann

10.	Changement climatique: enjeu mondial – réponse nationale	159
10.1.	Conséquences du changement climatique sur l'économie suisse	159
10.2	Comment répondre au changement climatique?	160
10.3	L'intérêt de réduire ses émissions de GES pour un petit pays (comme la Suisse)	169
11.	Leviers et instruments de la politique climatique	173
11.1	Grands déterminants des émissions de CO ₂	173
11.2	Leviers de la décarbonation	175
11.3	Les instruments de la politique climatique suisse	179
12.	Objectifs et résultats de la politique climatique suisse	185
12.1	Émissions de CO ₂ et objectifs de la Suisse	185
12.2	Perspectives	188
12.3	En résumé	189
	Références complémentaires	191
	Remerciements	193
	Notes	195
	Biographies	205

Listes des figures, tableaux et encadrés

Liste des figures

Fig. 1.1 La structure de l'atmosphère.	20
Fig. 1.2 Les ECV.	25
Fig. 1.3 Observation de la disparition de masse de glace aux pôles.	27
Fig. 1.4 Vue d'ensemble de certains changements climatiques observés par rapport à la température comme variable de référence.	28
Fig. 2.1 Radiation solaire incidente et radiation émise par la Terre.	29
Fig. 2.2 Incréments de concentration des GES.	38
Fig. 2.3 Relation linéaire entre les émissions cumulatives et l'élévation de la température de surface moyenne globale.	40
Fig. 3.1 Exemple de grille pour un modèle à l'échelle globale.	44
Fig. 3.2 Évolution des modèles climatiques illustrée schématiquement.	45
Fig. 3.3 Projections de la température moyenne de surface sur une décennie jusqu'en 2100.	47
Fig. 3.4 Influence humaine sur le climat, selon les modèles climatiques et les observations.	47
Fig. 3.5 Émissions de CO ₂ et changements de température selon les différents scénarios.	48
Fig. 3.6 Localisation des principaux points de bascule.	53
Fig. 4.1 Distribution géographique des principaux biomes à l'échelle mondiale.	59
Fig. 4.2 Les cinq facteurs directs des changements globaux.	64
Fig. 5.1 Chacun des grands écosystèmes (biomes) de la planète se distingue par des températures et des précipitations caractéristiques.	67
Fig. 5.2 Niche fondamentale et niche réalisée dans deux dimensions climatiques de l'environnement.	70
Fig. 5.3 Un exemple de système trophique.	71
Fig. 5.4 Schéma d'un réseau trophique simplifié de l'extrême Arctique.	72
Fig. 5.5 Les trois principales réactions des organismes face au changement climatique.	73
Fig. 5.6 Les trois principales réactions des organismes au changement climatique et leurs interactions dans le contexte des changements globaux.	77
Fig. 6.1 Impacts du changement et des extrêmes climatiques sur les écosystèmes à l'échelle globale.	80

Fig. 6.2 Illustration conceptuelle de la manière dont le risque d'extinction est affecté par les changements des phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes.	81
Fig. 6.3 Impacts de la croissance et de la migration en latitude des buissons dans l'Arctique.	89
Fig. 7.1 Part des pertes agricoles par types d'aléas en pourcentage (2007-2022).	101
Fig. 7.2 Impacts observés sur les sociétés humaines.	106
Fig. 7.3 La notion de risque.	108
Fig. 7.4 Risques en fonction de la température pour les systèmes humains et naturels.	110
Fig. 7.5 Population exposée à la hausse du niveau des mers en 2050.	112
Fig. 7.6 Risques pour la santé humaine liés à la chaleur et à l'humidité.	113
Fig. 7.7 Exposition à de multiples impacts extrêmes pour un réchauffement de 4 °C.	114
Fig. 7.8 Répartition globale du risque associé au changement climatique.	115
Fig. 8.1 Typologie des éléments de justice climatique distributive.	122
Fig. 8.2 Distribution des émissions de CO ₂ en fonction du revenu.	124
Fig. 8.3 Émissions de CO ₂ territoriales par personne.	125
Fig. 8.4 Émissions historiques de CO ₂ par région.	126
Fig. 9.1 Mécanisme d'accroissement de l'ambition.	145
Fig. 9.2 Évolution des émissions de GES selon différents scénarios.	148
Fig. 9.3 Taux de climatosceptiques par pays.	152
Fig. 9.4 Typologie des profils de climatosceptiques.	155
Fig. 10.1 Schéma des coûts avec réduction des émissions.	163
Fig. 10.2 Les grandes familles de mesures pour freiner le changement climatique et réduire ses effets.	164
Fig. 10.3 Schéma des coûts d'atténuation avec combinaison d'abattement et d'émissions négatives.	165
Fig. 10.4 Schéma des coûts avec adaptation.	167
Fig. 10.5 Schéma des coûts avec atténuation et adaptation.	168
Fig. 12.1 Parts des différents secteurs aux émissions totales de CO ₂ en 1990 et 2023.	187
Fig. 12.2 Émissions de GES de la Suisse.	190

Liste des tableaux

Tableau 10.1 Coûts externes liés aux énergies fossiles.	161
Tableau 10.2 Points de vue possibles sur les coûts externes.	162
Tableau 10.3 Émissions de GES mondiales contrôlées ou influencées depuis la Suisse en 2019.	172
Tableau 11.1 Décomposition de Kaya pour la Suisse (1990-2050).	174

Tableau 11.2 Moyens d'actionner les leviers de la décarbonation.	180
Tableau 12.1 Émissions de GES de la Suisse en 1990 – par type et sources principales (% des émissions totales).	186

Liste des encadrés

Encadré 1.1 Qu'est-ce que le système climatique ?	19
Encadré 2.1 Qu'est-ce que la sensibilité climatique ?	31
Encadré 2.2 Qu'est-ce qu'une rétroaction climatique ?	33
Encadré 3.1 Qu'est-ce que les scénarios RCP et SSP du Giec ?	49
Encadré 4.1 Qu'est-ce qu'un écosystème ?	58
Encadré 4.2 Qu'est-ce que les services écosystémiques ?	60
Encadré 5.1 Qu'est-ce que la niche écologique ?	69
Encadré 7.1 Qu'est-ce que le risque ?	107
Encadré 8.1 Qu'entend-on par justice ?	117
Encadré 9.1 Qu'est-ce que la neutralité carbone ?	147
Encadré 11.1 Qu'est-ce que l'effet rebond ?	178

Abréviations

Aosis	Alliance des petits États insulaires
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDN	Contributions déterminées au niveau national
CFC	Chlorofluorocarbone
CH ₄	Méthane, gaz naturel
CO ₂	Dioxyde de carbone, gaz carbonique
CO ₂ eq	Équivalent CO ₂
COP	Conference of the Parties, Conférence des parties
ECV	Essential Climate Variables, variables climatiques essentielles
Enso	El Niño – Southern Oscillation
ESA	European Space Agency, Agence spatiale européenne
ESM	Earth System Models, Système Terre
GCOS	Global Climate Observing System
GES	Gaz à effet de serre
Giec	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GMSL	Élévation du niveau moyen des océans
Gt	Gigatonne
H+	Ion hydrogène
H ₂ O	Eau, vapeur d'eau
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
LCL	Loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique
Lulucf	Land Use, Land-Use Change, and Forestry, utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
Ma	Million d'années
MEA	Millennium Ecosystem Assessment, Évaluation des écosystèmes pour le millénaire
mm	Millimètre
N ₂	Azote
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NAO	Oscillation nord-atlantique
Nasa	National Aeronautics and Space Administration
O ₂	Oxygène
ODD	Objectifs de développement durable
Ofen	Office fédéral de l'énergie
Ofev	Office fédéral de l'environnement

OFS	Office fédéral de la statistique
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONG	Organisation non gouvernementale
PBC	Point de bascule climatique, <i>tipping point</i>
pH	Potentiel hydrogène
PIB	Produit intérieur brut
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
ppb	Parties par milliard
ppm	Parties par million
RCP	Representative Concentration Pathway, trajet de concentration représentatif
RDC	République démocratique du Congo
REDD+	Réduction des émissions de GES dues à la déforestation et à la dégradation des forêts
RS	Recueil systématique du droit fédéral
SSP	Shared Socioeconomic Pathway, trajectoires socio-économiques partagées
TCRE	Transient Climate Response to Cumulative CO ₂ Emissions
UE	Union européenne
UTC	Temps universel coordonné
UV	Ultraviolets

Introduction

Le changement climatique est sans doute l'un des plus grands défis de notre époque. Il façonne déjà notre monde à une vitesse sans précédent et menace de bouleverser profondément nos sociétés, nos économies et les écosystèmes dont nous dépendons. Pourtant, malgré une science climatique robuste et très bien établie depuis des décennies, malgré les nombreuses alertes lancées par les scientifiques et la société civile, et malgré les effets visibles qui se manifestent déjà partout sur la planète, les progrès des mesures de lutte contre le changement climatique sont lents et encore insuffisants à ce jour. Malgré des années de communication et de vulgarisation, le sujet reste mal compris, minimisé, voire parfois rejeté par une partie de la population et de la classe politique. Comprendre en détail les fondements de ce phénomène, ses impacts sur les écosystèmes dont nous dépendons pour vivre et la complexité de ses ramifications sociales et de sa gouvernance est pourtant essentiel pour toute personne, qu'elle soit étudiante, engagée dans la société ou simplement intéressée. Cet ouvrage a donc pour objectif de fournir une compréhension claire et accessible du changement climatique, en expliquant ses bases scientifiques, ses impacts sur notre environnement et ses implications sociétales, ainsi que les solutions envisageables.

Les changements que nous observons aujourd'hui dans le climat de la planète diffèrent fondamentalement de ceux du passé en ce qu'ils sont directement imputables aux activités humaines. L'augmentation rapide des températures et la multiplication des événements climatiques extrêmes, ainsi que des impacts comme la fonte des glaciers, l'élévation du niveau de la mer et le changement de distribution des espèces sont largement attribués aux activités émettrices de gaz à effet de serre (GES), en particulier la combustion des énergies fossiles et la déforestation massive. La communauté scientifique, à travers le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), alerte régulièrement sur la nécessité d'une action immédiate pour limiter ces bouleversements.

Comprendre le changement climatique nécessite donc de s'intéresser aux mécanismes physiques, chimiques et biologiques qui régissent le fonctionnement global de la planète Terre. L'effet de serre est un phénomène naturel indispensable à la vie sur terre. Sans lui, notre planète serait une boule de glace inhabitable. Cependant, l'augmentation actuelle des concentrations de GES (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, etc.) entraîne un réchauffement global qui perturbe la stabilité que le climat terrestre a connue durant les dix derniers milliers d'années.

Les scientifiques utilisent des modèles climatiques sophistiqués pour prévoir les évolutions futures du climat et ses conséquences sur les systèmes socio-écologiques. Ces modèles intègrent de nombreuses variables, comme l'activité humaine, les interactions atmosphériques et océaniques, ainsi que les cycles biogéochimiques et la

distribution des grands biomes (grands écosystèmes) sur la surface terrestre et dans les océans. Le consensus scientifique est sans appel : si l'humanité ne réduit pas drastiquement ses émissions de GES, la température mondiale pourrait dépasser largement les + 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici la fin du siècle, avec le franchissement de points de bascule et des conséquences désastreuses pour les écosystèmes et les sociétés humaines.

Les effets du changement climatique concernent à la fois les systèmes naturels – tels que les écosystèmes, les espèces végétales et animales, les systèmes hydrographiques, ou des processus géomorphologiques comme la stabilité des versants, etc. – et les sociétés humaines, qui peuvent être affectées directement, par exemple par un ouragan, ou indirectement par la détérioration des conditions écologiques dans lesquelles elles évoluent. Les impacts du changement climatique ne sont toutefois pas homogènes et se manifestent de manières différentes à divers endroits du globe. Si par exemple certaines régions subissent des vagues de chaleur records, d'autres font face à des inondations catastrophiques ou à des sécheresses prolongées. Le changement climatique est un phénomène global par nature, mais ses causes et ses conséquences se manifestent au contraire dans des contextes souvent très locaux et affichent de fortes disparités.

Le changement climatique est donc bien plus qu'un simple problème environnemental. Il pose aussi des questions fondamentales de justice sociale et d'éthique, de rapports de forces politiques et de fonctionnement de nos systèmes économiques. Les populations les plus vulnérables, qui contribuent le moins aux émissions de GES, sont souvent les plus touchées par les effets du réchauffement. Les populations des pays en développement, les peuples autochtones et les communautés côtières paient déjà un lourd tribut aux dérèglements climatiques, alors qu'ils disposent de moins de ressources pour s'adapter. D'un point de vue politique, la lutte contre le changement climatique exige une coopération internationale sans précédent. Les accords comme celui de Paris en 2015 ont marqué une avancée, mais les engagements pris restent encore insuffisants pour limiter le réchauffement sous la barre des + 1,5 °C. Les tensions entre pays développés et en développement sur la répartition des efforts et des financements climatiques rendent les négociations internationales complexes et lentes au regard de l'urgence de la situation. Sur le plan économique, la transition vers une économie bas carbone est à la fois un défi et une opportunité. De nombreux secteurs doivent se réinventer, notamment l'énergie, les transports, l'agriculture et l'industrie. Les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique, l'économie circulaire ou les politiques de sobriété représentent des leviers essentiels pour réduire notre impact tout en créant de nouveaux emplois et en stimulant l'innovation, mais ces solutions peinent à trouver leur place dans un système économique et énergétique encore largement dominé par la consommation et les énergies fossiles. Des mesures d'adaptation au changement climatique devront également être mises en place. Elles pourront s'appuyer en partie sur des solutions

technologiques, mais aussi sur des solutions basées sur la nature, telles que la préservation des écosystèmes ou le verdissement des villes.

Si ce tableau peut sembler alarmant, il est crucial de rappeler que les sociétés humaines ont encore le pouvoir d'agir. Réduire les émissions de GES passe par des actions collectives et individuelles. Les gouvernements peuvent mettre en place des politiques ambitieuses : taxation du carbone, réglementation stricte des industries polluantes, investissements massifs dans les énergies propres, mesures d'efficacité énergétique et de réorientation de la consommation. Les entreprises ont aussi un rôle clé à jouer en intégrant des critères environnementaux dans leurs stratégies et en développant des modèles d'affaires et des technologies plus durables. Quant aux citoyennes et citoyens, ils peuvent influencer le changement par leurs choix de consommation, leur mode de transport ou leur engagement politique et associatif.

Comprendre le changement climatique et ses différents enjeux est nécessaire à la mise en place de solutions efficaces, cohérentes et équitables, à toutes les échelles. L'objectif de ce livre est donc d'expliquer le changement climatique de manière accessible et rigoureuse, en s'appuyant sur les connaissances scientifiques les plus récentes. Les parties qui suivent explorent les différentes dimensions de cette crise, des causes aux impacts en passant par les différentes stratégies d'atténuation et d'adaptation qui peuvent être mobilisées.

Le livre est structuré en quatre parties, elles-mêmes divisées en chapitres, qui offrent une vue d'ensemble des bases scientifiques du problème, de ses enjeux et des principaux leviers d'action pour y remédier.

La **première partie** pose les fondements scientifiques du changement climatique, en expliquant la définition et la composition du système climatique terrestre (chapitre 1), son bilan énergétique et ses modifications par les émissions anthropiques de GES (chapitre 2), la manière dont les scientifiques modélisent le système climatique pour mieux comprendre ses évolutions passées et futures, ainsi que les principaux effets du changement climatique sur les systèmes naturels (chapitre 3).

La **deuxième partie** s'intéresse en particulier à l'impact du changement climatique sur les écosystèmes, en détaillant l'interaction entre le changement climatique et les autres composantes des changements globaux (chapitre 4), la relation entre climat et organismes vivants grâce aux concepts de base de l'écologie scientifique (chapitre 5) et les impacts du changement climatique sur les différents types d'écosystèmes, à l'échelle mondiale et en Suisse (chapitre 6).

La **troisième partie** est consacrée aux enjeux sociaux du changement climatique. Elle commence par décrire ses conséquences pour les sociétés humaines (chapitre 7), puis montre en quoi le changement climatique pose des questions pressantes de justice, entre les pays et à l'intérieur des pays (chapitre 8). Elle termine sur les principes généraux de la gouvernance mondiale du climat et sur les raisons qui peuvent faire obstacle à la mise en œuvre de politiques climatiques à la hauteur des enjeux (chapitre 9).

La *quatrième partie*, enfin, aborde les stratégies de lutte contre le changement climatique au niveau national (chapitre 10), les différents leviers et instruments de politique publique que les pays peuvent appliquer pour décarboner leur économie, notamment en Suisse (chapitre 11), et pose un regard sur les objectifs et résultats de la politique climatique suisse (chapitre 12).

PARTIE 1

Les bases scientifiques

Jacopo Grazioli et Samuel Jaccard

1. Le système climatique

La thématique du changement climatique est devenue omniprésente dans nos vies, touchant pratiquement tous les aspects de la société, de l'économie et de la politique. Sa prévalence s'explique par l'ampleur des défis qu'elle pose et par les conséquences visibles (ou non) qu'elle entraîne à différentes échelles spatiales. Le changement climatique est un sujet majeur d'actualité régulièrement traité par les médias, que ce soit à travers des rapports scientifiques, des événements climatiques extrêmes (canicules, tempêtes, sécheresse, inondations) ou des débats politiques, parfois nourris. Il façonne également l'opinion publique, poussant les citoyens et citoyennes à adapter leur comportement et à exiger des actions plus ambitieuses de la part des gouvernements et des entreprises. Les États et organisations internationales intègrent le changement climatique dans leurs politiques, avec des accords comme l'accord de Paris et des objectifs de réduction des émissions de CO₂. Les politiques environnementales, les taxes carbone et les plans d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques sont devenus des sujets incontournables.

Avant d'aborder de telles considérations, il nous paraît pertinent de prendre du recul afin de définir les concepts généraux et les mécanismes fondamentaux qui régissent le système climatique. Cette partie introductive propose ainsi une vue d'ensemble de son fonctionnement et des principales observations, des bilans énergétiques de la planète et de leurs perturbations, du paléoclimat (c'est-à-dire de l'étude des climats passés) ainsi qu'une introduction aux modèles climatiques et à leur fonctionnement.

1.1 Composition et interconnexions du système climatique

Encadré 1.1 Qu'est-ce que le système climatique ?

Le Giec définit le système climatique comme « un système extrêmement complexe composé de cinq éléments principaux : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère, ainsi que les interactions entre ces éléments. Le système climatique évolue dans le temps sous l'influence de sa dynamique interne et en raison de perturbations externes (appelés forçages) telles que les éruptions volcaniques, les variations solaires et les forçages d'origine anthropique tels que la modification de la composition de l'atmosphère et les changements d'utilisation des terres ». Les sections qui suivent visent à définir plus précisément les composantes du système climatique, les forçages qui font évoluer le système pour arriver, à la fin, à une définition du climat.

Atmosphère

L'**atmosphère** est l'enveloppe gazeuse qui entoure notre planète. Elle est constituée, en volume, d'environ 78 % d'azote (N_2), de 21 % d'oxygène (O_2), de vapeur d'eau (H_2O , environ 1 % en moyenne) et d'autres gaz dits à l'état de traces, comme le CO_2 à hauteur de 0,04 %. Essentielle à la vie, l'atmosphère joue plusieurs rôles : elle protège la surface des rayonnements ultraviolets nocifs, régule la température terrestre et permet la respiration. En observant la variation de la densité des gaz terrestres, on estime que l'épaisseur de l'atmosphère terrestre varie entre 350 et 800 km, selon l'activité solaire.

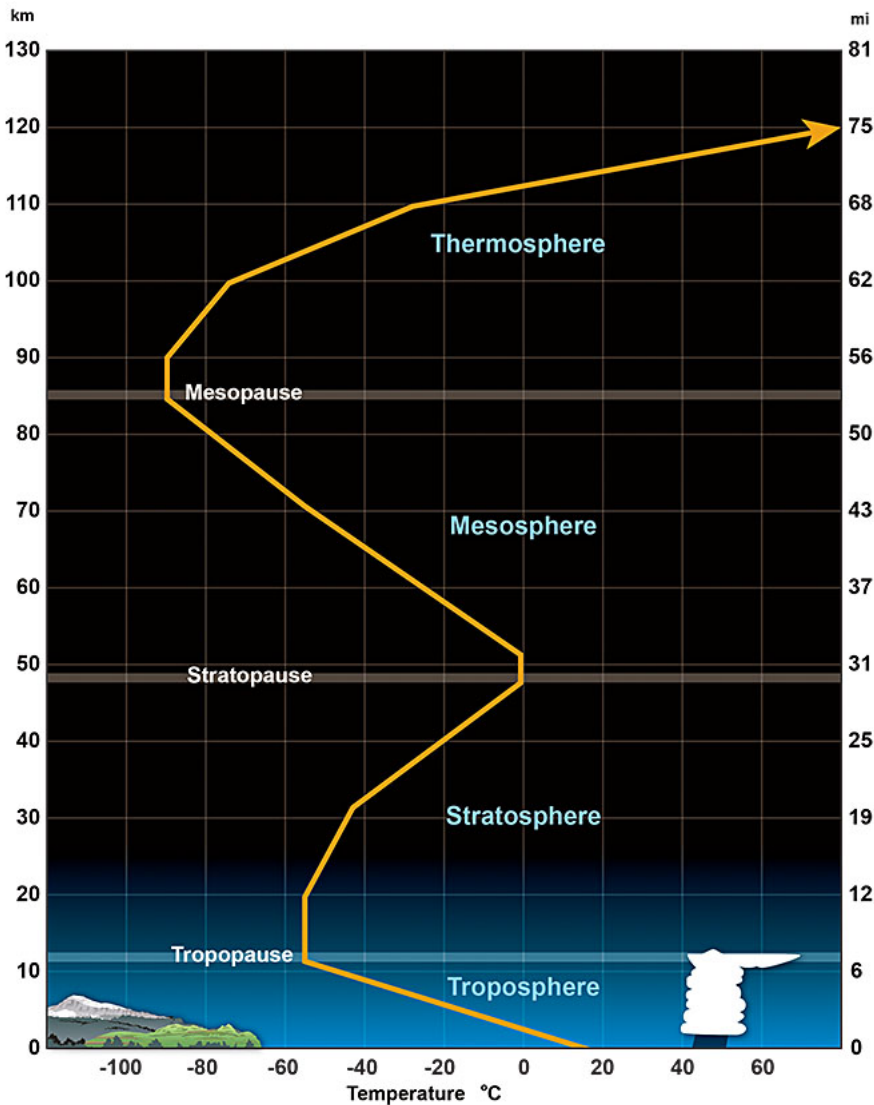


Fig. 1.1 La structure de l'atmosphère¹.

L'atmosphère, bien qu'hétérogène et soumise à d'importantes variations géographiques et saisonnières, présente une structure récurrente déterminée par l'évolution de la température en fonction de l'altitude (figure 1.1). En ce qui concerne le climat, notre attention se portera principalement sur la partie inférieure de l'atmosphère. En particulier, la partie la plus basse de l'atmosphère est appelée **troposphère**² et se caractérise par une *diminution* progressive de la température *en fonction de l'altitude*. L'air y est chauffé par la surface terrestre, et sa capacité à retenir la chaleur dépend de sa densité : plus il est dense – donc proche du niveau moyen de la mer –, plus il peut contenir de la chaleur. Nous en faisons aisément l'expérience au quotidien : dans une même région géographique, il fait plus froid en montagne que dans les vallées. De même, un plateau élevé – comme le Tibet – peut présenter des températures plus basses qu'une région montagneuse située ailleurs, en raison d'une densité de l'air nettement plus faible. L'épaisseur de la troposphère varie selon la latitude et atteint environ 12 km aux latitudes moyennes. C'est dans cette couche inférieure de l'atmosphère que se produisent la majorité des phénomènes météorologiques et climatiques.

Au sommet de la troposphère se trouve la tropopause, une zone de transition où la tendance de la température s'inverse. Elle marque la frontière entre la troposphère et la **stratosphère**, qui s'étend à son tour jusqu'à 50 km d'altitude. Dans cette région, l'air est chauffé par l'absorption du rayonnement ultraviolet émis par le Soleil, ce qui provoque une augmentation progressive de la température avec l'altitude. Outre la présence de nuages stratosphériques, cette couche joue un rôle important : lors d'éruptions volcaniques, des aérosols peuvent être projetés au-delà de la troposphère ; une fois dans la stratosphère, ils peuvent se disperser sur de vastes distances à l'échelle planétaire. La stratosphère abrite la majeure partie de la couche d'ozone, essentielle pour filtrer le rayonnement ultraviolet. À son sommet, la température atteint environ $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, un seuil à partir duquel la vapeur d'eau présente peut se condenser et geler.

Hydrosphère

L'**hydrosphère** désigne l'ensemble de l'eau présente sur terre, qu'elle soit à l'état liquide (océans, mers, rivières) ou gazeux (vapeur d'eau dans l'atmosphère). L'hydrosphère joue un rôle essentiel dans la régulation du climat, le fonctionnement des écosystèmes et le cycle de l'eau, fondamental à la vie sur terre. Environ 71 % de la surface terrestre est couverte d'eau, principalement sous la forme d'océans. La majeure partie de l'eau sur terre est ainsi salée. Une grande partie de l'eau douce, qui représente seulement environ 2,5 % de l'eau totale, est stockée dans les glaciers et les calottes glaciaires.

L'hydrologie, science étudiant le cycle de l'eau, s'intéresse à sa distribution, son mouvement, sa qualité et ses interactions avec l'environnement terrestre. Son objectif principal est d'expliquer le cycle de l'eau, qui comprend des processus tels que l'évaporation, la condensation, les précipitations, l'infiltration et le ruissellement. Ce cycle implique des changements d'état ainsi que des transferts de masse et d'énergie.

Bien qu'il soit souvent introduit dès l'école primaire sous une forme simplifiée, il s'avère, en réalité, complexe à modéliser, notamment en raison de ses interactions étroites et multiples avec les autres composantes du système climatique.

Certains processus de l'hydrosphère agissent à l'échelle globale et influencent l'ensemble du système climatique. Un exemple emblématique est la ***circulation thermohaline***, parfois aussi appelée circulation océanique globale. Elle désigne un vaste système de courants marins régulé par les variations de température et de salinité de l'eau de mer. Les différences de densité liées à ces deux paramètres, génèrent des mouvements verticaux et horizontaux dans les océans à l'échelle planétaire.

Les eaux froides et salées – donc plus denses – plongent dans les profondeurs océaniques, tandis que les eaux plus chaudes (et donc moins denses) remontent vers la surface. Ce processus se manifeste particulièrement à l'approche des pôles, où l'eau se refroidit fortement et devient plus salée en raison de l'évaporation et/ou de la formation de glace de mer (banquise). L'eau dense ainsi formée s'écoule ensuite en profondeur vers l'équateur, établissant un circuit continu qui connecte l'ensemble des océans. La circulation thermohaline assure le transport de chaleur, de nutriments, de salinité et d'oxygène (entre autres) à travers le globe. Elle joue un rôle crucial dans le système climatique en redistribuant l'énergie thermique : elle transfère des eaux chaudes des régions tropicales vers les régions polaires, contribuant au réchauffement régional et à l'équilibre climatique global.

Cryosphère

L'hydrosphère se distingue de la ***cryosphère*** qui comprend toutes les régions, continentales et océaniques, où l'eau est présente à l'***état solide*** – sous forme de neige et de glace. La cryosphère comprend notamment les calottes polaires, les glaciers de montagne, la neige, le pergélisol (ou permafrost), les calottes glaciaires, les inlandsis³ ainsi que la glace de mer (banquise). La cryosphère joue un rôle fondamental dans le système climatique. Elle influence le niveau des mers, contribue à la régulation thermique de la planète en réfléchissant une partie importante du rayonnement solaire incident (albédo) et intervient activement dans le cycle de l'eau, en stockant de grandes quantités d'eau douce sous forme de glace et de neige.

Lithosphère

La ***lithosphère***, autre composante importante du système terrestre, correspond à la couche externe, rigide, de la Terre. Elle comprend la croûte ainsi que la partie supérieure du manteau terrestre. Cette rigidité permet aux plaques tectoniques de se déplacer. Son épaisseur varie selon les régions, allant d'environ 70 à 150 km, avec une lithosphère généralement plus épaisse sous les continents que sous les océans. Bien qu'elle ne représente qu'une fine couche par rapport au rayon terrestre (qui dépasse 6000 km), la lithosphère joue un rôle essentiel dans la dynamique de la planète. On considère souvent que la partie intérieure de la planète n'appartient pas au système climatique. Cependant, elle peut en affecter la dynamique, notamment à travers les éruptions volcaniques, qui sont considérées comme un forçage

externe au système climatique en injectant dans l'atmosphère des gaz et des aérosols capables de modifier temporairement le climat (voir section 2.1)

Biosphère

La **biosphère** désigne l'ensemble des écosystèmes (voir définition section 4.1) de la Terre, c'est-à-dire la zone dans laquelle la vie existe, incluant tous les organismes vivants et leurs interactions avec l'environnement, qu'il soit terrestre, aquatique ou atmosphérique. Elle interagit avec le système climatique en modifiant les propriétés de la surface terrestre (albédo, rugosité), en régulant le cycle de l'eau et d'autres cycles biogéochimiques (du carbone [C], de l'azote [N] et du phosphore [P] notamment). La biosphère dépend ainsi étroitement des autres sphères de la Terre. Les impacts humains sur la biosphère, tels que la déforestation et les changements d'utilisation des sols, intensifient les effets climatiques, ce qui rend cette sphère cruciale pour la compréhension et l'atténuation du changement climatique.

Anthroposphère

L'**anthroposphère** est composée de tous les systèmes et structures créés par l'être humain qui interagissent avec l'environnement naturel. Elle reflète l'impact croissant des activités humaines sur les systèmes terrestres, à travers des processus tels que l'urbanisation, l'industrialisation, l'agriculture ou encore les transports. Bien que son statut de composante à part entière du système climatique ne fasse pas encore l'unanimité, l'anthroposphère est de plus en plus considérée comme un élément central dans l'analyse des dynamiques planétaires. Sa définition est étroitement liée au concept d'Anthropocène, une proposition (controversée) de nouvelle époque géologique qui serait caractérisée par l'influence profonde, généralisée et durable des activités humaines sur la Terre. Les émissions de GES, l'extraction massive des ressources naturelles et les changements d'utilisation des sols ne contribuent pas seulement au réchauffement climatique, mais aussi à la pollution globale et à l'érosion de la biodiversité. Intégrer cette composante dans l'étude du climat apparaît donc essentiel afin d'appréhender pleinement les rétroactions entre l'humanité et le système climatique.

Le système climatique se distingue par la complexité des interactions entre ses différentes composantes. Ces interactions sont souvent non linéaires et s'étendent sur de vastes échelles spatiales et temporelles, allant de quelques minutes à plusieurs milliers, voire millions d'années (Ma).

Le **climat** peut ainsi, de manière simplifiée, être défini comme l'**état du système climatique**. En pratique, il s'agit de la description statistique des variables caractérisant les différentes composantes de ce système – variables que nous détaillerons – observées sur une période suffisamment longue. Il s'agit typiquement d'intervalles de vingt à trente ans, ce qui permet de distinguer clairement le climat de la **météo**, qui concerne des phénomènes à l'échelle de quelques jours à quelques semaines.

Il est important de souligner que, bien que les changements climatiques se manifestent sur des décennies, ils sont souvent moins perceptibles que les fluctuations

météorologiques quotidiennes. Une journée froide, une semaine inhabituellement chaude ou une saison plus pluvieuse que la moyenne influencent plus directement notre perception que des tendances de long terme. Ainsi, même si la définition théorique du climat est claire, notre compréhension intuitive de la notion peut être biaisée par la variabilité que nous expérimentons au jour le jour. C'est pourquoi il est essentiel de s'appuyer sur des observations rigoureusement standardisées et des analyses statistiques fiables plutôt que sur des impressions personnelles pour évaluer l'état réel du système climatique.

1.2 Observation du système climatique

Notre compréhension du changement climatique repose sur des mesures systématiques de nombreux paramètres décrivant l'état du système climatique. Pour être significatives, ces observations doivent s'inscrire dans des séries temporelles longues et couvrir, autant que possible, l'ensemble des zones géographiques, y compris les calottes glaciaires, les profondeurs océaniques et les différentes couches de l'atmosphère. Ces observations permettent aux scientifiques de détecter les tendances à long terme mais aussi de calibrer et valider les modèles utilisés dans les projections. Cette section explore les méthodes d'observation du climat et les résultats qui en découlent, en suivant la structure définie précédemment.

À ce stade, une question fondamentale se pose : quels paramètres faut-il mesurer pour évaluer l'état du climat ? En d'autres termes, quelles variables ou propriétés physiques faut-il monitorer de manière systématique ? Le système mondial d'observation du climat (Global Climate Observing System [GCOS]) a identifié un ensemble de variables climatiques essentielles (Essential Climate Variables [ECV]) indispensables à la compréhension du système climatique terrestre (figure 1.2). Parmi les plus intuitives figurent la température, les précipitations, la composition de l'atmosphère et le niveau de la mer. Mais d'autres variables, peut-être moins évidentes, telles que les feux de forêt, les concentrations en nutriments ou l'utilisation anthropique de l'eau sont également cruciales. À ce jour, 55 ECV ont été définies, couvrant l'atmosphère, la surface terrestre, les océans et la cryosphère (figure 1.2).

Les observations doivent être effectuées à la surface de la Terre, dans l'atmosphère et sous la surface, notamment dans les océans. Celles qui sont faites à la surface terrestre sont fondamentales pour constituer des séries de données climatiques fiables. Les réseaux de stations météorologiques enregistrent une variété de paramètres tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, le vent, l'albédo ou encore les précipitations. En Suisse, par exemple, le réseau de stations de MétéoSuisse assure la collecte et l'archivage systématiques de ces données sur l'ensemble du territoire, fournissant ainsi une base essentielle pour l'étude des évolutions climatiques à l'échelle régionale.

Le monitoring de l'atmosphère repose notamment sur l'utilisation de radiosondes, des instruments embarqués à bord de ballons météorologiques souvent

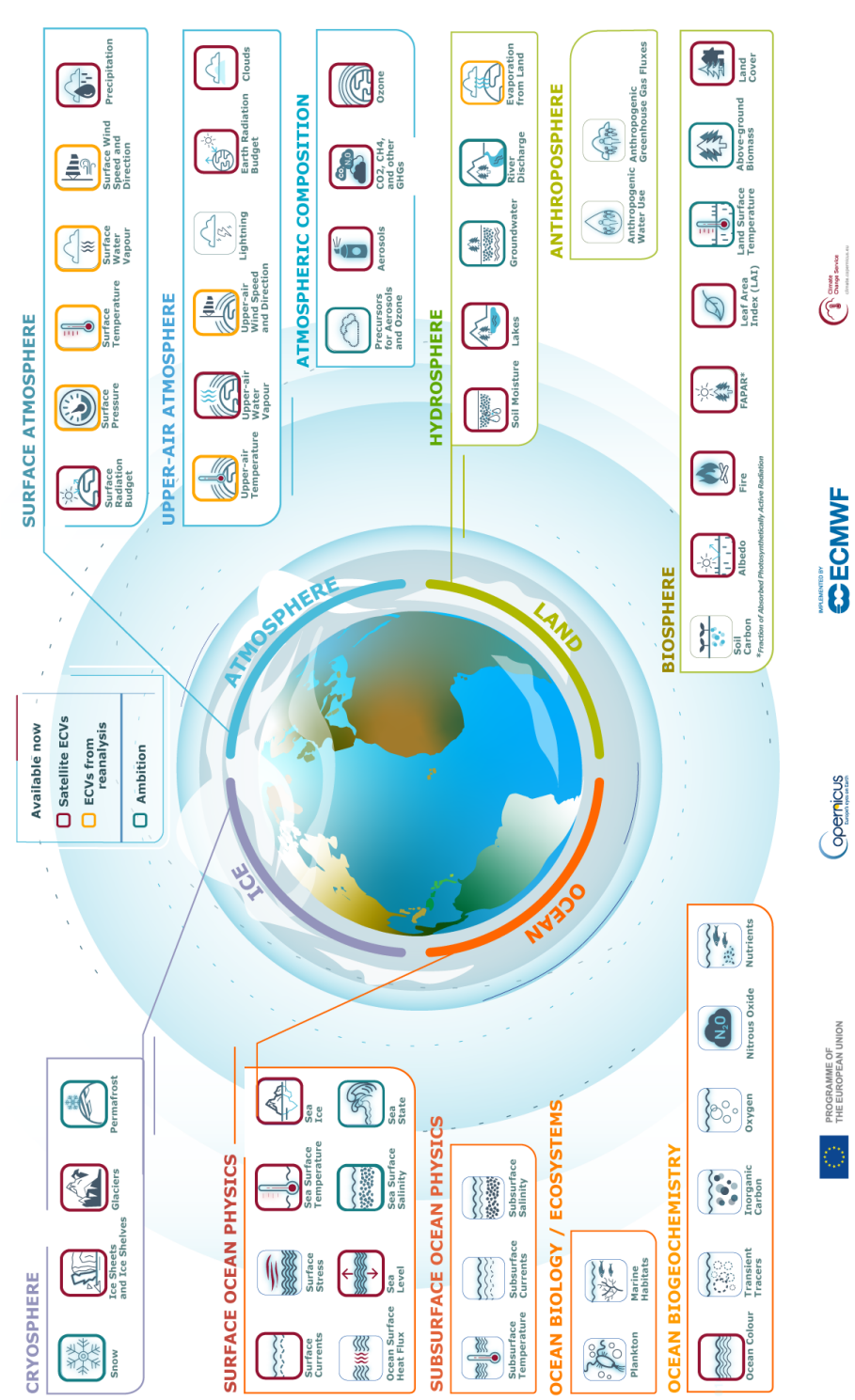


Fig. 1.2 Les ECV⁴.

gonflés à l'hélium. Ces sondes mesurent en temps réel des variables essentielles telles que la température, la pression atmosphérique et l'humidité, à différents niveaux de l'atmosphère. En Suisse, la station de MétéoSuisse à Payerne constitue un site de référence pour ce type de mesure, avec deux lâchers de radiosonde par jour, à 00 et 12 UTC. Cette fréquence et ces horaires sont standardisés à l'échelle mondiale : tous les services météorologiques procèdent à ces lancements des sondes simultanément, en temps universel coordonné (UTC), afin d'obtenir un instantané de l'état de l'atmosphère au moins deux fois par jour.

Les satellites jouent également un rôle crucial dans la surveillance de la surface et de l'atmosphère de notre planète. Équipés d'instruments de télédétection (mesure à distance), ils permettent de mesurer indirectement un large éventail de variables climatiques comme la couverture glaciaire, les températures de surface des océans et les concentrations de GES dans l'atmosphère. Des agences spatiales telles que l'Agence spatiale européenne (European Space Agency [ESA]) et la Nasa (National Aeronautics and Space Administration) conduisent des missions d'observation à l'échelle planétaire, contribuant à une meilleure compréhension des phénomènes globaux tels que la fonte des glaces polaires ou les modifications de la circulation océanique. Ces observations satellitaires sont également précieuses pour détecter des anomalies régionales, comme l'évolution de la couverture neigeuse dans les régions de montagne, à l'image des Alpes.

Les réseaux d'observation mondiaux intègrent des données issues de diverses sources, notamment des stations de surface, des radiosondes et des satellites. Ces réseaux, coordonnés par des organisations telles que l'Organisation météorologique mondiale (OMM), assurent une couverture globale ainsi qu'une cohérence et une standardisation des données collectées. La combinaison d'observations locales et globales permet aux scientifiques d'identifier les tendances à long terme et d'élaborer des prévisions climatiques fiables.

Le changement climatique actuel

C'est essentiellement grâce aux observations systématiques recueillies depuis de nombreuses décennies que nous disposons aujourd'hui de preuves solides et convergentes du changement climatique en cours, ainsi que de ses causes. Ainsi, des séries de données indépendantes, de différentes sources, confirment une hausse continue des températures à la surface du globe avec une majorité des années les plus chaudes enregistrée au cours de la dernière décennie.

Le **régime des précipitations**, quant à lui, présente une variabilité plus marquée selon les régions : certaines zones subissent une intensification des précipitations et des événements extrêmes, tels que les inondations, tandis que d'autres sont confrontées à des épisodes de sécheresse sévère. Si les tendances globales en matière de températures sont nettes, les évolutions en matière de précipitations s'avèrent plus complexes à décrire en raison de leur forte variabilité spatiale et temporelle.

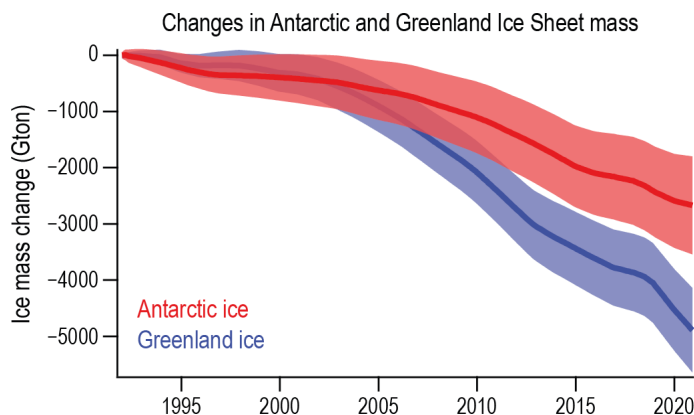


Fig. 1.3 Observation de la disparition de masse de glace aux pôles⁵.

La **fonte accélérée des glaciers et des calottes glaciaires** constitue sans doute une des manifestations les plus visibles du réchauffement climatique, aussi bien dans les régions montagneuses que dans les régions polaires (figure 1.3). Ce recul presque inexorable des surfaces englacées contribue de manière significative à l'augmentation du niveau des mers : plus de la moitié de cette hausse est attribuée à la fonte des glaces continentales, tandis qu'environ un tiers résulte de la dilatation thermique des océans, conséquence directe de leur réchauffement⁵.

Les impacts du changement climatique sont inégalement répartis à la surface du globe avec d'importantes variations spatiales. L'un des exemples les plus marquants est que les terres émergées se réchauffent plus rapidement que les océans (figure 1.4). Cela s'explique principalement par leur capacité thermique beaucoup plus élevée que la surface terrestre : il faut davantage d'énergie pour réchauffer un volume d'eau que pour réchauffer une même masse de sol. Ainsi, même exposés à une quantité similaire d'énergie solaire, les océans emmagasinent et redistribuent la chaleur de façon plus diffuse et plus lente que la surface terrestre. De surcroît, ils sont parcourus par des mouvements de convection (la circulation thermohaline mentionnée précédemment) qui permettent de répartir la chaleur en profondeur et sur de vastes étendues.

En Suisse, les Alpes figurent parmi les régions les plus affectées par l'augmentation des températures. Le réchauffement accélère le recul des glaciers, ce qui a des répercussions directes sur la disponibilité de l'eau en aval, en particulier pendant les mois chauds. Par ailleurs, les étés tendent à devenir plus secs tandis que les précipitations hivernales augmentent, notamment dans les régions méridionales comme le Tessin. Ce changement de la répartition saisonnière des précipitations pourrait avoir d'importantes conséquences sur les écosystèmes, l'agriculture et la gestion des ressources hydriques (voir chapitre 6).

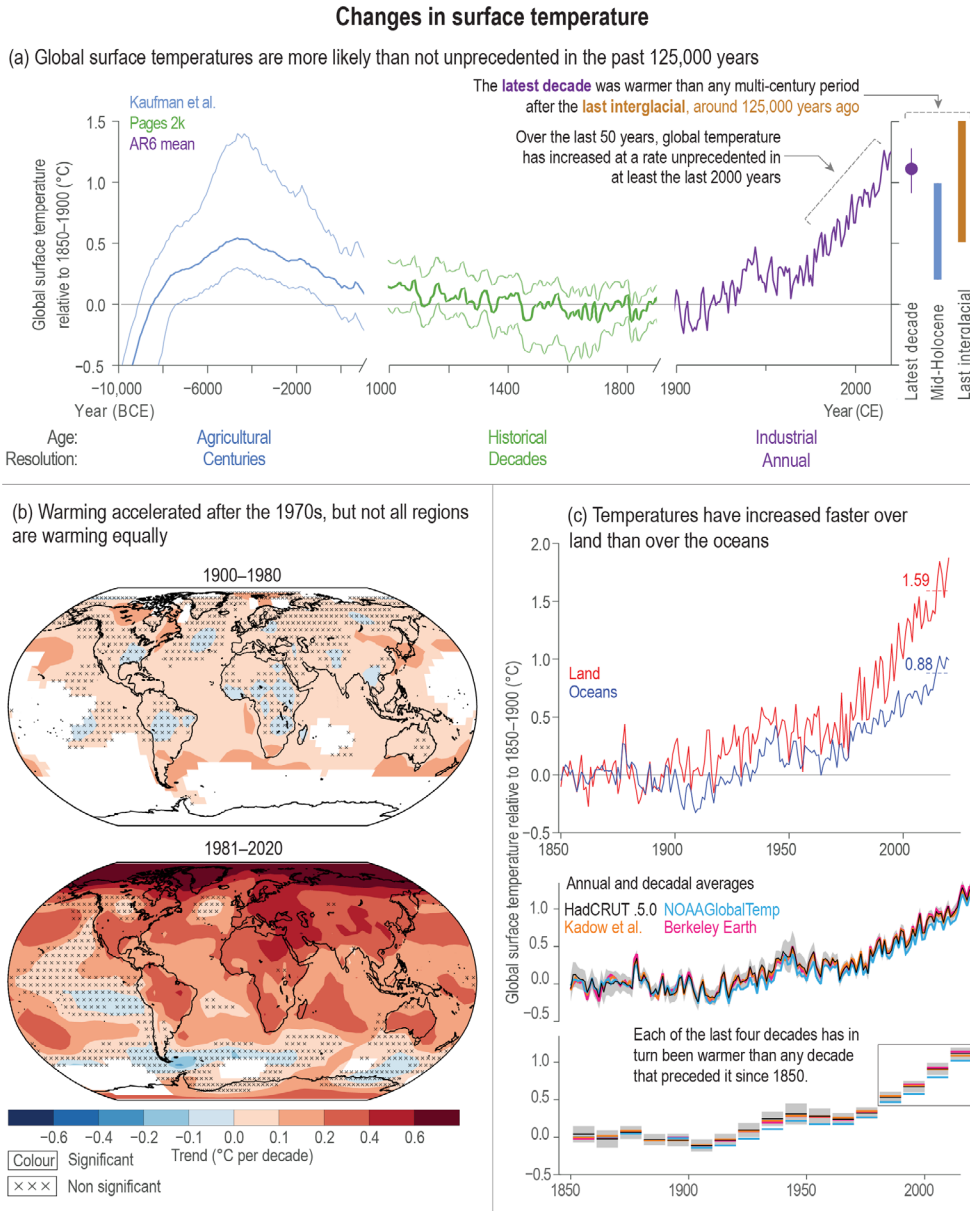


Fig. 1.4 Vue d'ensemble de certains changements climatiques observés par rapport à la température comme variable de référence⁶.

2. Bilan énergétique du système climatique et sa perturbation par les humains

Le comportement du système climatique est fondamentalement régi par les variations de l'équilibre énergétique de la Terre. La principale source d'énergie du système climatique terrestre est le rayonnement solaire incident. La manière dont cette énergie interagit avec la surface de la Terre, l'atmosphère et d'autres composants détermine à la fois la variabilité et son évolution à long terme. Le rayonnement solaire agit comme le *moteur du système climatique*. Le soleil fournit de l'énergie couvrant l'ensemble du spectre des ondes électromagnétiques, principalement sous forme d'ultraviolets (UV), de lumière visible et de rayonnement proche infrarouge (figure 2.1). Ces rayonnements constituent ce que l'on appelle le rayonnement à ondes courtes, dont les longueurs d'onde varient entre quelques fractions de micromètres et quelques micromètres. Ce rayonnement constitue le principal apport énergétique du système climatique terrestre.

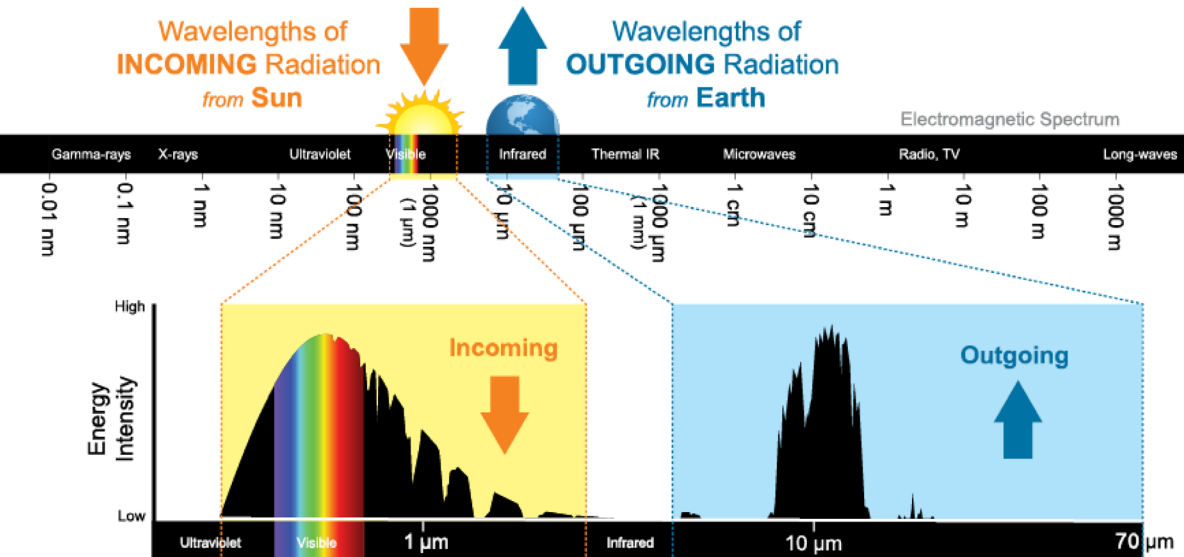


Fig. 2.1 Radiation solaire incidente et radiation émise par la Terre¹.

Lorsque le rayonnement solaire atteint la Terre, une partie est absorbée par la surface et l'atmosphère, contribuant ainsi au réchauffement, tandis que le reste est réfléchi dans l'espace par les nuages, les surfaces enneigées ou glacées et d'autres éléments à fort albédo (figure 2.1). L'équilibre entre l'énergie absorbée et l'énergie réfléchie est connu sous le nom de bilan énergétique de la Terre. Il constitue un facteur essentiel pour le maintien d'un équilibre à long terme. Toute perturbation de cet équilibre, notamment celles causées par l'augmentation des GES, entraîne un déséquilibre appelé forçage radiatif qui est au cœur du processus de changement climatique.

2.1 Le bilan énergétique de la Terre et ses facteurs de forçage

Le bilan énergétique de la Terre désigne l'équilibre entre l'énergie que la Terre reçoit du Soleil, celle renvoyée dans l'espace et celle temporairement stockée par le système climatique. La quasi-totalité des échanges énergétiques entrants ou sortants s'effectue sous forme de rayonnements. Bien que d'autres sources, comme la chaleur géothermique de la Terre ou l'énergie dégagée par les marées, existent, leur contribution est négligeable par rapport à l'énergie solaire incidente. Ce bilan énergétique intègre également les flux d'énergie internes au système climatique, qui caractérisent son état dynamique. À l'échelle terrestre, le bilan énergétique prend en compte le rayonnement solaire (ondes courtes) et le rayonnement thermique (ondes longues) ainsi que les flux non radiatifs tels que la chaleur sensible (liée aux gradients de température) et la chaleur latente (liée aux changements d'état de l'eau, comme l'évaporation ou la condensation). Le bilan énergétique de la surface joue un rôle déterminant dans le cycle global de l'eau, la dynamique de l'atmosphère et des océans, ainsi que de nombreux processus de surface. Sa perturbation peut avoir des effets en cascade sur l'ensemble du système climatique.

Dans un climat stable, les composantes radiatives entrantes et sortantes sont, en moyenne mondiale et sur le long terme, en équilibre. Cet équilibre n'exclut toutefois pas l'existence de fluctuations naturelles autour de cette valeur moyenne, en raison de la variabilité interne, naturelle, du climat.

La variabilité interne désigne les fluctuations naturelles du système climatique, qui se manifestent sur des échelles de temps allant des conditions météorologiques quotidiennes à des phénomènes multi-décennaux. Elle résulte des interactions complexes entre les différentes composantes du système terrestre – atmosphère, océans, cryosphère, biosphère et surface continentale. Un exemple bien connu de cette variabilité est le phénomène Enso (El Niño ou Southern Oscillation), qui sera abordé plus loin.

Forçage radiatif de la Terre

Lorsqu'une perturbation, d'origine naturelle ou anthropique, modifie le bilan énergétique de la Terre, le système climatique réagit en se réchauffant ou en se

refroidissant (c'est-à-dire que le système gagne ou perd de l'énergie, respectivement). Le forçage radiatif désigne précisément cette modification du bilan énergétique de l'atmosphère terrestre résultant de facteurs qui altèrent la quantité d'énergie entrante ou sortante du système climatique.

Plusieurs éléments peuvent induire un forçage radiatif. Parmi les mécanismes de forçage radiatif positif, on trouve notamment les GES, qui absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge, contribuant ainsi à piéger la chaleur dans l'atmosphère. D'autres exemples incluent la réduction de l'albédo en raison de la fonte de la neige et de la glace ou aux changements d'utilisation des sols, ce qui entraîne une plus grande absorption du rayonnement solaire par la surface terrestre. À l'inverse, certains mécanismes induisent un forçage radiatif négatif. C'est le cas des aérosols d'origine volcanique ou humaine, qui augmentent la réflexion du rayonnement solaire vers l'espace, réduisant ainsi l'énergie absorbée par le système et provoquant un effet de refroidissement.

Un déséquilibre persistant du bilan radiatif peut entraîner des ajustements dans les paramètres climatiques, menant à un nouvel état d'équilibre du système.

Encadré 2.1 Qu'est-ce que la sensibilité climatique ?

La sensibilité climatique est une mesure de la façon dont la température moyenne de la surface de la Terre réagit à une variation de la concentration en CO_2 et autres forçages radiatifs. Elle constitue un paramètre central dans la modélisation climatique. La sensibilité du climat au CO_2 est souvent exprimée comme la variation de température associée à un doublement de la concentration atmosphérique de CO_2 par rapport aux niveaux préindustriels. Cette mesure, appelée sensibilité climatique à l'équilibre, suppose que le système climatique a eu le temps de s'ajuster complètement aux changements de forçage, mais ne prend pas en compte les rétroactions liées au cycle du carbone (voir plus bas). Les estimations actuelles de la sensibilité climatique à l'équilibre se situent entre 2,5 °C et 4 °C, reflétant à la fois les incertitudes dans la compréhension du système climatique et les limites des modèles.

Les forçages externes désignent des influences sur le système climatique étrangères à sa dynamique interne naturelle. Ils agissent comme des conditions limites qui entraînent des déséquilibres du bilan énergétique global. Le premier type de forçage externe est lié aux variations de l'**activité solaire**. Les cycles solaires entraînent de légères fluctuations de l'irradiance solaire, c'est-à-dire de la quantité d'énergie solaire atteignant la Terre. Bien que ces variations soient faibles, elles peuvent produire des effets cumulatifs sur le climat au fil du temps. L'**activité volcanique** constitue un autre forçage externe majeur. Les éruptions volcaniques explosives peuvent projeter d'importantes quantités de cendres et du dioxyde de soufre dans la stratosphère,

formant des aérosols réfléchissants. Ces aérosols augmentent l'albédo de la Terre en réfléchissant une partie du rayonnement solaire incident, ce qui provoque un refroidissement temporaire de la surface. Il peut sembler contre-intuitif de considérer les volcans comme externes au système climatique. Toutefois, si la lithosphère fait partie intégrante du système climatique, les processus volcaniques, eux, prennent leur origine dans les couches plus profondes du manteau terrestre qui ne sont pas considérées comme faisant partie du système climatique proprement dit.

Forçages internes

Contrairement aux facteurs externes, les forçages internes résultent de processus intrinsèques au système climatique lui-même. Ils procèdent d'interactions dynamiques et souvent complexes entre ses différentes composantes. Parmi ces phénomènes figurent les **téléconnexions**, c'est-à-dire des anomalies climatiques – de pression, de température ou de précipitations – corrélées entre des régions éloignées, parfois séparées par des milliers de kilomètres.

Un exemple particulier de téléconnexion est l'oscillation El Niño, qui modifie, à l'échelle planétaire, la répartition des températures et des précipitations. Lors d'un épisode El Niño, les températures de la surface de la mer, plus élevées que la normale dans l'océan Pacifique tropical, perturbent la circulation atmosphérique globale. À l'inverse, la phase négative de l'Enso, connue sous le nom de La Niña, se caractérise par des températures de surface plus basses que la normale dans la même région, entraînant des effets opposés. Un deuxième exemple de téléconnexion est l'oscillation nord-atlantique (ou NAO), qui influence les conditions climatiques en Europe et en Amérique du Nord. Pour une exploration plus approfondie de ce phénomène, nous invitons le lecteur à consulter des sources spécialisées².

Forçages anthropiques

Les activités humaines sont désormais reconnues comme une force dominante dans l'altération du système climatique. La combustion d'agents énergétiques fossiles (pétrole, gaz, charbon), la déforestation ainsi que divers processus industriels, comme la production de ciment, ont entraîné une augmentation soutenue des concentrations de GES et d'aérosols dans l'atmosphère depuis la révolution industrielle au XVIII^e siècle. Ce **forçage anthropique** induit des effets perturbant le bilan énergétique sur de très longues durées, amplifiant largement l'effet de serre naturel et accélérant le changement climatique mondial. Comprendre le forçage radiatif nous permet de saisir la complexité du système climatique et l'importance de réduire les émissions GES afin d'atténuer autant que possible le réchauffement futur.

Les changements de quantité des principaux GES – dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄) et protoxyde d'azote (N₂O) – dans l'atmosphère jouent un rôle important dans la détermination des propriétés radiatives de la Terre et de son climat dans le passé, le présent et l'avenir. Depuis 1950, l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère est la principale cause du changement climatique dont l'origine est indiscutablement liée à la consommation toujours plus importante

d'énergies fossiles. Si les émissions directes des activités humaines constituent le principal facteur d'évolution des GES atmosphériques au cours des 200 dernières années, l'accumulation nette de GES dans l'atmosphère est contrôlée par la dynamique des échanges de carbone entre les différents réservoirs. La combustion d'énergies fossiles et le changement d'utilisation des terres (déforestation, urbanisation des terres agricoles) au cours de la période 1750-2024 ont libéré dans l'atmosphère une quantité estimée à 2510 ± 275 Gt CO₂, dont moins de la moitié s'accumule dans l'atmosphère aujourd'hui (voir ci-après).

Encadré 2.2 Qu'est-ce qu'une rétroaction climatique ?

Le Giec définit le principe de rétroaction (ou *feed-back*) climatique comme une interaction dans laquelle la perturbation d'une variable climatique provoque, dans une seconde variable, des changements qui influencent à leur tour la variable initiale. En d'autres termes, une rétroaction est une action en retour d'un effet sur le mécanisme qui lui a donné naissance. On parle de rétroaction positive (négative) lorsque le processus par lequel un changement initial dans le système climatique entraîne des effets secondaires qui amplifient (atténuent) ce changement. L'augmentation de la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère consécutive du réchauffement planétaire (l'air chaud pouvant contenir plus d'humidité [environ 7 % d'humidité en plus par degré de réchauffement selon la loi de Clausius-Clapeyron]) est un exemple de rétroaction positive, la vapeur d'eau constituant un GES qui amplifie le réchauffement.

L'influence des émissions anthropiques de CO₂ sur le système carbone-climat constitue un moteur central du changement climatique. Ces émissions activent des puits de carbone terrestres et océaniques qui agissent comme des rétroactions négatives en limitant partiellement l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère. Ces rétroactions jouent un rôle crucial dans la régulation du forçage radiatif, et, par conséquent, du climat global.

Les rétroactions carbone-climat peuvent soit amplifier, soit atténuer le changement climatique en modifiant la vitesse à laquelle le CO₂ s'accumule dans l'atmosphère. Cela dépend de l'interaction – souvent non linéaire – entre les concentrations croissantes de CO₂ et les effets du réchauffement sur les processus biogéochimiques à la surface des continents et des océans.

Un indicateur clé, dans ce contexte, est la fraction atmosphérique (*airborne fraction* en anglais) qui représente la part des émissions de CO₂ restant dans l'atmosphère, par opposition à celle absorbée par les puits terrestres et océaniques. Durant la décennie 2010-2019, environ 41 % des émissions anthropiques de CO₂ se sont accumulées dans l'atmosphère, tandis que 34 % ont été absorbées par les écosystèmes terrestres et 25 %, par les océans.

Les rétroactions positives et négatives du climat et du cycle du carbone impliquent : (i) des processus rapides sur la Terre et dans les océans à des échelles de temps allant de quelques minutes à quelques années, tels que la photosynthèse, la respiration bactérienne et les échanges gazeux entre l'océan et l'atmosphère ; et (ii) des processus plus lents s'étalant sur des décennies à des millénaires, notamment les changements du pouvoir tampon des océans (qui désigne leur capacité à réguler les variations de pH), la circulation océanique, la dynamique de la végétation, le dégel du pergélisol, la formation et la décomposition des tourbières. En fonction de la combinaison des facteurs et des dynamiques de réponse, ils peuvent se comporter comme des rétroactions positives ou négatives qui amplifient ou atténuent respectivement l'ampleur et le taux de variation du changement climatique.

L'excès de chaleur généré par le forçage radiatif dû à l'augmentation de la concentration de CO_2 atmosphérique et d'autres GES est principalement absorbé par l'océan (> 90 %)³.

2.2 Perturbations anthropiques des concentrations atmosphériques de GES

Les concentrations atmosphériques actuelles des trois principaux GES sont plus élevées qu'elles ne l'ont jamais été au cours des 800 000 dernières années (voir section 2.3). En 2024, elles ont atteint 424,6 parties par million (ppm) de CO_2 , 1942,9 parties par milliard (ppb) de CH_4 et 337,9 ppb de N_2O . Les concentrations actuelles de CO_2 dans l'atmosphère sont également sans précédent au cours des deux derniers millions d'années. Au cours des 60 Ma écoulées, la Terre a connu des périodes où les concentrations de CO_2 étaient nettement plus élevées qu'aujourd'hui, mais de nombreuses sources de données montrent que le taux de croissance des concentrations de CO_2 atmosphérique au cours de la période 1900-2019 est au moins 10 fois plus rapide qu'à n'importe quel autre moment au cours des 800 000 dernières années, et 4 à 5 fois plus rapide qu'au cours des 56 Ma écoulées, sur la base de nos connaissances actuelles.

Il est important de souligner que, si la Terre a déjà connu par le passé des concentrations en CO_2 plus élevées qu'aujourd'hui, ces périodes ont eu cours bien avant l'apparition de l'espèce humaine. *Homo sapiens* n'est apparu que très récemment à l'échelle des temps géologique – il y a environ 300 000 ans – et a évolué dans un climat relativement stable et tempéré. Les systèmes naturels, économiques et sociaux que nous connaissons aujourd'hui se sont développés dans des conditions climatiques stables de l'Holocène – couvrant les derniers 10 000 ans – et non dans un monde caractérisé par des taux extrêmement élevés de CO_2 .

Émissions de CO_2

La principale source d'émissions anthropiques de CO_2 est la combustion d'agents énergétiques fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz. Elle représente environ 87 % des émissions totales. La déforestation et les autres changements d'utilisation

des sols contribuent également à hauteur d'environ 10 % aux émissions mondiales de CO₂. En outre, les activités industrielles, telles que la production de ciment, libèrent du CO₂ par le biais de processus chimiques, contribuant ainsi à hauteur d'environ 3 % aux émissions globales.

Depuis la révolution industrielle qui a commencé vers 1750, les émissions mondiales de CO₂ n'ont cessé de croître (figure 2.2), avec de courtes interruptions dues à des crises économiques ou à des instabilités sociales. En 2022, elles avaient atteint environ 37,5 Gt CO₂ par an. Les émissions de CO₂ d'origine fossile ont augmenté de 0,9 % par an dans les années 1990 puis de 3 % par an dans les années 2000, avant de revenir à un taux de croissance de 1,2 % entre 2010 et 2019. Le ralentissement de la croissance des émissions de CO₂ d'origine fossile au cours de la dernière décennie est dû à un ralentissement de la croissance de l'utilisation du charbon. Les principaux pays émetteurs sont aujourd'hui la Chine, les États-Unis, l'UE et l'Inde, bien que les émissions par personne soient les plus élevées dans les pays les plus riches, y compris la Suisse (section 9.2).

Le flux net de CO₂ résultant du changement d'utilisation des terres se compose d'émissions liées à la perte de biomasse et de stockage de carbone dans les sols due à la déforestation, d'émissions liées au drainage des tourbières et d'absorption par la végétation.

Les données issues de multiples sources convergent pour montrer que les activités humaines sont la principale cause de l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. En particulier, les analyses de la composition isotopique du CO₂ révèlent une évolution caractéristique liée à la combustion des combustibles fossiles. Le CO₂ issu de ces sources fossiles présente en effet une signature isotopique distincte, avec un rapport plus faible de l'isotope lourd ¹³C par rapport à l'isotope léger ¹²C, contrairement au CO₂ d'origine naturelle, généralement plus enrichi en ¹³C.

Par ailleurs, on observe une très légère diminution de la teneur en oxygène dans l'atmosphère, cohérente avec la consommation d'O₂ lors de la combustion des énergies fossiles. Enfin, les mesures de la concentration en carbone ¹⁴C (radiocarbone) montrent un appauvrissement progressif de l'atmosphère en cet isotope radioactif. Ce phénomène, connu sous le nom d'*effet Suess*, reflète l'injection dans l'atmosphère de carbone ancien – issu de gisements de charbon, de pétrole et de gaz fossile – dépourvu de ¹⁴C car formé il y a plusieurs millions d'années.

Au cours des soixante dernières années, la fraction atmosphérique est restée relativement constante, à environ 41 %. Cela suggère que les puits de CO₂ terrestres et océaniques ont continué à croître à un rythme compatible avec l'augmentation des émissions de CO₂. Toutefois, il n'est pas certain que les puits océaniques et terrestres continueront d'augmenter aussi rapidement que les émissions de CO₂ dans l'atmosphère (voir ci-après).

D'un point de vue mécanistique, l'absorption par l'océan du carbone anthropique est un ensemble de processus physiques en deux étapes, qui impliquent l'échange de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan de surface, suivi de son transfert

dans l'océan profond, où il peut être stocké pendant des décennies, voire des millénaires. Le flux atmosphère-océan et le stockage du CO_2 anthropique sont donc largement influencés par les concentrations atmosphériques de CO_2 et les processus physico-chimiques océaniques. L'absorption cumulée de CO_2 par les océans ($620 \pm 75 \text{ Gt CO}_2$) en 2019 représente environ 25 % des émissions totales de CO_2 d'origine anthropique depuis la révolution industrielle. Le CO_2 absorbé a entraîné une modification de la chimie des carbonates océaniques vers un état moins basique, communément appelée « acidification des océans », avec des conséquences néfastes pour les écosystèmes marins, en particulier les récifs coralliens.

On estime que le puits terrestre net de CO_2 a augmenté au cours des six dernières décennies et qu'il a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO_2 depuis 1750, soit $840 \pm 220 \text{ Gt CO}_2$. L'absorption du carbone par la photosynthèse exerce un contrôle de premier ordre sur le puits terrestre net de CO_2 . Ainsi, l'hémisphère nord, qui concentre environ deux tiers des masses terrestres mondiales, contribue davantage au puits de CO_2 que l'hémisphère sud, les forêts boréales et tempérées y contribuant le plus. L'augmentation du puits net de CO_2 terrestre s'explique principalement par deux facteurs : l'effet fertilisant du CO_2 qui stimule la photosynthèse dans de nombreuses régions, et l'accroissement de la disponibilité de l'azote liée à l'eutrophisation (excès de nutriments) des écosystèmes, en grande partie d'origine anthropique.

En outre, la diminution des émissions de CO_2 liées aux feux de forêt, ainsi que l'augmentation de l'absorption de carbone par la végétation en raison de la réduction des surfaces brûlées dans le monde ont contribué à renforcer le puits terrestre net de CO_2 au cours des dernières décennies. Contrairement au puits océanique, plus stable dans le temps, le puits terrestre présente une forte variabilité interannuelle. Celle-ci est en grande partie liée à la sensibilité des écosystèmes tropicaux aux fluctuations climatiques, notamment à la dynamique de l'Enso. En période d'El Niño, les conditions plus chaudes et plus arides dans les régions tropicales entraînent en effet un affaiblissement significatif du puits net de CO_2 .

Émissions de méthane (CH_4)

Le CH_4 est un puissant GES dont le potentiel de réchauffement est environ 28 fois supérieur à celui du CO_2 sur une période de cent ans, ce qui fait de l'augmentation de sa concentration un facteur important pour le changement climatique.

En 2024, les concentrations atmosphériques de CH_4 atteignent 1936 ppb, soit 700 ppb de plus que les niveaux préindustriels (figure 2.2). Cette augmentation marquée témoigne de l'influence croissante des activités humaines sur le cycle du CH_4 . La variabilité des concentrations de CH_4 dans l'atmosphère résulte principalement du bilan net entre les émissions (sources) et les absorptions (puits) à la surface de la Terre, ainsi que de sa dégradation chimique dans l'atmosphère, en particulier par réaction avec le radical hydroxyle (OH).

Les émissions de CH_4 sont significatives et ont à la fois des sources naturelles et anthropiques. Les plus importantes sont issues des zones humides et de certains

processus géologiques, tandis que les émissions anthropiques les plus sérieuses sont liées à la digestion du bétail, à la culture du riz, au traitement des déchets, aux décharges et à l'extraction et à l'utilisation de combustibles fossiles. Les zones humides représentent la plus grande source naturelle de CH_4 , estimée à environ 26 % des émissions mondiales. Ces dernières varient fortement d'une année à l'autre, en fonction de l'étendue des surfaces inondées, des conditions de température et de l'activité microbienne impliquées dans la production de CH_4 .

Au cours des deux derniers siècles, les émissions de CH_4 ont presque doublé, en grande partie sous l'effet des activités humaines, particulièrement depuis le début du XXe siècle. Durant cette période, elles ont continuellement dépassé les pertes naturelles et chimiques dans l'atmosphère. Depuis le début des mesures directes du CH_4 dans l'atmosphère dans les années 1970, les taux de croissance les plus élevés ont été observés entre 1977 et 1986, atteignant en moyenne 15 ± 5 ppb par an. Cette accélération est en grande partie attribuée à la révolution verte qui a stimulé la production agricole à grande échelle, ainsi qu'à une industrialisation rapide dans plusieurs régions du monde. Après une période marquée par un ralentissement des taux de croissance ($0,48 \pm 3,2$ ppb par an) attribué à des facteurs économiques et naturels, les concentrations de CH_4 dans l'atmosphère ont de nouveau augmenté au cours de la dernière décennie ($9,3 \pm 2,4$ ppb par an) pour des raisons qui restent débattues. Contrairement au CO_2 , le CH_4 a un temps de résidence atmosphérique relativement court – entre 9 et 12 ans –, ce qui entraîne une répartition spatiale moins homogène. Les concentrations de CH_4 sont ainsi légèrement plus élevées dans l'hémisphère nord, ce qui suggère que la majorité des émissions anthropiques viennent de cette zone, en particulier d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Asie.

Émissions de protoxyde d'azote (N_2O)

Dans les écosystèmes naturels, le protoxyde d'azote (N_2O) est principalement produit lors de la reminéralisation de la matière organique sur terre et dans l'océan. La production nette de N_2O est très sensible aux conditions environnementales locales telles que la température, la concentration en oxygène, le pH et la disponibilité de l'azote. Les changements dans l'abondance atmosphérique de N_2O résultent en grande partie de l'équilibre entre les sources nettes de N_2O sur terre et dans les océans et la destruction photochimique de N_2O dans la stratosphère.

La perturbation du cycle naturel de l'azote par les activités humaines – notamment par l'utilisation d'engrais organiques (fumier) et synthétiques, ainsi que par la combustion de combustibles fossiles – est le principal facteur à l'origine de l'augmentation du N_2O atmosphérique. Entre 1980 et 2024, celles-ci ont atteint $32,0 \pm 0,5$ ppb, soit environ 10 % (figure 2.2). Parmi les sources émergentes, les émissions de N_2O provenant de l'aquaculture connaissent l'une des croissances les plus rapides, bien que leur contribution reste marginale dans le budget global. Les principales sources anthropiques non agricoles incluent l'industrie chimique, le traitement des eaux usées et la combustion de combustibles fossiles.

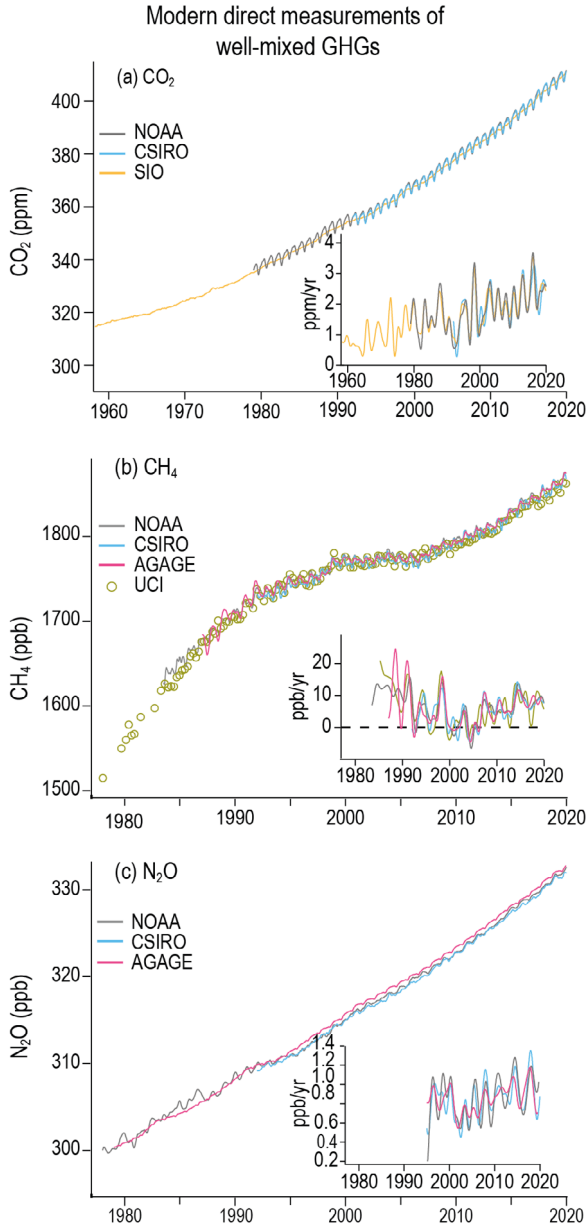


Fig. 2.2 Incréments de concentration des GES⁴.

Le N_2O possède une très longue vie atmosphérique, supérieure à cent ans, ce qui signifie qu'il faudrait plus d'un siècle après l'arrêt des émissions mondiales pour que les concentrations atmosphériques se stabilisent. L'augmentation du N_2O atmosphérique est particulièrement préoccupante, non seulement en raison de sa contribution au forçage radiatif mais aussi en raison de son implication directe dans la

destruction de l'ozone stratosphérique, ce qui renforce son impact sur le système climatique et la santé des écosystèmes.

L'influence totale des GES anthropiques sur le bilan radiatif de la Terre résulte de l'effet combiné de ces différents gaz. Sur la période 1960-2019, la contribution relative du forçage radiatif effectif total était estimée à environ 63 % pour le CO₂, 11 % pour le CH₄, 6 % pour le N₂O et 17 % pour les gaz halogénés tels que les chlorofluorocarbones (CFC).

Des observations récentes suggèrent que les processus liés au carbone océanique commencent à évoluer en réponse à l'augmentation continue du puits de carbone. Ces changements pourraient entraîner un affaiblissement progressif de la capacité des océans à absorber le CO₂ atmosphérique, en particulier dans les scénarios d'émissions moyennes à élevées (voir encadré 3.1). Cette rétroaction du système océanique représente un enjeu majeur pour la dynamique future du climat.

Permanence des effets, introduction au concept de budget carbone

Les deux derniers rapports du Giec (AR 5 et 6) ont établi une relation quasi linéaire entre les émissions cumulées de CO₂ et l'augmentation de la température moyenne mondiale (voir figure 2.3). Cette relation implique que chaque quantité supplémentaire de CO₂ émise entraîne un réchauffement global prévisible.

L'ampleur du réchauffement par unité d'émissions cumulées de CO₂ est appelée réponse climatique transitoire aux émissions cumulées de CO₂ (Transient Climate Response to Cumulative CO₂ Emissions [TCRE]), un indicateur clé en science du climat. Selon les estimations du Giec, la TCRE se situe entre 0,27 et 0,63 °C pour 1000 Gt CO₂ émis.

La TCRE est aujourd'hui un outil central pour estimer la quantité d'émissions de CO₂ compatible avec des objectifs de limitation du réchauffement climatique. Cette estimation est connue sous le nom de **budget carbone restant**. Par exemple, en supposant une TCRE de 0,45 °C pour 1000 Gt CO₂, les émissions futures totales ne devraient pas dépasser à 500 Gt CO₂ à partir d'aujourd'hui pour maintenir le réchauffement planétaire à moins de 1,5 °C (à une probabilité de 50 %). À titre de comparaison, les émissions cumulées de CO₂ depuis 1850 sont estimées à 2650 ± 250 Gt CO₂, ce qui correspond à un réchauffement de 1,2 °C à 1,3 °C. Si les émissions mondiales se poursuivent au rythme actuel d'environ 40 Gt CO₂ par an, le seuil de 1,5 °C pourrait être franchi d'ici à 2030. Cela souligne l'urgence d'engager des réductions drastiques et durables des émissions de CO₂ à long terme, à l'échelle mondiale, pour rester dans les limites fixées par l'accord de Paris.

Les conséquences de l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère sont durables, certains effets persistant pendant des siècles, voire des millénaires, même si les émissions étaient entièrement éliminées. Le réchauffement climatique est donc effectivement irréversible à l'échelle humaine. Dès lors, seule une stratégie combinant réductions drastiques des émissions de CO₂ et retrait actif du CO₂ de l'atmosphère – *via* des technologies ou des processus naturels permettant

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)

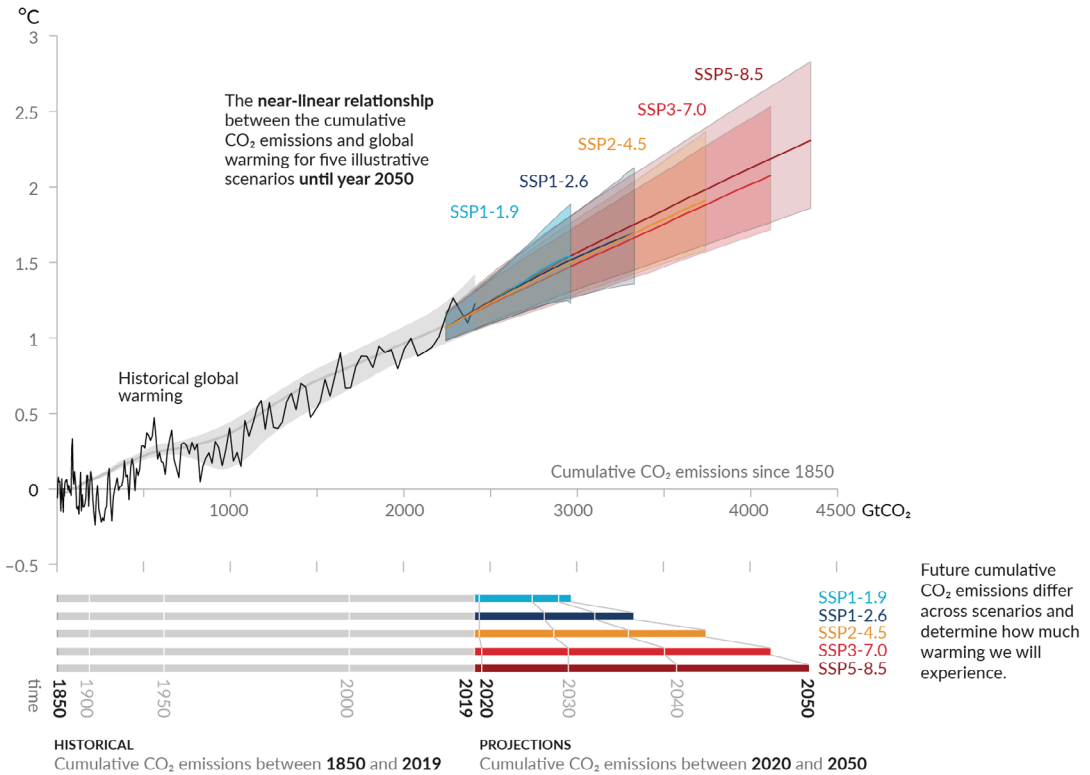


Fig. 2.3 Relation linéaire entre les émissions cumulatives et l'élévation de la température de surface moyenne globale⁵.

un stockage permanent – pourrait inverser la tendance au réchauffement. Ces émissions négatives sont désormais considérées comme indispensables pour atteindre les objectifs climatiques à long terme.

Les scientifiques ont élaboré le concept de zéro émissions nettes qui désigne l'équilibre entre la quantité de GES émise dans l'atmosphère et celle activement éliminée (voir encadré 9.1). Concrètement, cela signifie que toute émission produite doit être compensée par une élimination équivalente, par des processus naturels ou technologiques. Il convient toutefois de souligner que les méthodes permettant d'éliminer activement des quantités importantes de CO₂ de l'atmosphère ne sont pas encore totalement opérationnelles à grande échelle. Les éléments clés de l'objectif zéro émissions nettes reposent donc d'abord sur des réductions significatives des émissions de combustibles fossiles, notamment par la diminution de l'usage des combustibles fossiles, le recours accru aux énergies renouvelables et une amélioration de l'efficacité énergétique (voir section 11.2). Toutefois, les solutions visant

à éliminer le carbone de l'atmosphère doivent être développées plus avant afin de niveler les émissions. Elles comprennent à la fois des approches naturelles (par exemple, le boisement, l'amélioration de l'altération atmosphérique, la fertilisation des océans) et technologiques (par exemple, le captage et le stockage du carbone, le captage direct dans l'air).

L'objectif de neutralité carbone est essentiel pour limiter le réchauffement climatique, réduire les risques liés à l'effondrement des calottes glaciaires, à l'intensification des événements météorologiques extrêmes et à la perte de biodiversité. De plus, de nombreuses études montrent que la transition vers une économie plus durable peut générer des co-bénéfices importants, notamment en matière d'emploi, de santé publique et de sécurité énergétique (voir la section 10.2).

2.3 Le paléoclimat

Les reconstructions paléoclimatiques, basées sur des archives climatiques telles que les carottes de glace, les coraux, les sédiments lacustres et marins, s'étendent au-delà de la variabilité climatique récente et fournissent donc une perspective indépendante sur les rétroactions entre les mécanismes de forçage et la réponse du système climatique. D'après les reconstructions, ces changements passés étaient beaucoup plus lents que les changements anthropogéniques actuels, de sorte qu'ils ne peuvent pas fournir une comparaison sans équivoque. Néanmoins, elles peuvent aider à évaluer les sensibilités et indiquer les mécanismes de changement potentiellement dominants⁶.

Les archives paléoclimatiques fournissent des données climatiques à long terme qui permettent de tester, de valider et d'améliorer les modèles climatiques en comparant les variations climatiques passées avec les simulations des modèles. Les archives paléoclimatiques permettent notamment de tester les réponses des modèles aux variations de CO₂ et de valider les estimations de la sensibilité climatique, c'est-à-dire le degré de réchauffement par doublement des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Enfin, les archives paléoclimatiques permettent d'évaluer les événements climatiques extrêmes, les changements climatiques abrupts et les points de basculement.

Dans un passé lointain, il y a des millions d'années, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère ont atteint des niveaux bien plus élevés qu'aujourd'hui. Bien que les reconstructions paléoclimatiques puissent être entachées d'incertitudes significatives, les concentrations de CO₂ les plus élevées du Cénozoïque – l'ère géologique qui a suivi la disparition des dinosaures, il y a 66 Ma – ont culminé à 1500-2000 ppm et ont ensuite diminué progressivement. Les cinquante derniers millénaires ont en effet été caractérisés par un déclin progressif des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère à un rythme d'environ 16 ppm par an. La cause exacte de ce déclin à long terme reste incertaine mais pourrait être liée à un déséquilibre entre les sources géologiques de CO₂ (dégazage volcanique) et les puits à long terme (enfouissement du carbone organique dans les sédiments marins et soulèvement et érosion des montagnes).

L'intervalle le plus récent caractérisé par des niveaux de CO_2 atmosphérique similaires aux niveaux modernes (c'est-à-dire 400-450 ppm) a été la période chaude du milieu du pliocène (3,3 à 3,0 Ma). Malgré des niveaux de CO_2 atmosphérique similaires, les températures moyennes mondiales étaient supérieures de 2 à 4 °C à celles de l'ère préindustrielle. En particulier, les températures de l'Arctique étaient jusqu'à 10-12 °C plus élevées que celles de l'ère préindustrielle (amplification polaire) et, par conséquent, les régions polaires étaient largement dépourvues de glace en été. Les nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ont été considérablement réduites, ce qui a entraîné un niveau de la mer de 10 à 25 m plus élevé qu'aujourd'hui. Les observations paléoclimatiques suggèrent donc que les calottes glaciaires polaires peuvent devenir instables lorsque les concentrations atmosphériques de CO_2 dépassent 400 ppm. Enfin, dans un contexte climatique plus chaud qu'aujourd'hui, des conditions similaires à celles d'El Niño ont pu persister.

Les carottes de glace de l'Antarctique, qui couvrent les derniers 800 000 ans, constituent une archive importante pour explorer les changements passés dans la dynamique du climat et les rétroactions avant les perturbations anthropogéniques⁷. Les carottes de glace polaire représentent les seules archives climatiques à partir desquelles les concentrations passées de GES peuvent être directement mesurées. Le CH_4 , le N_2O et le CO_2 covarient généralement sur des échelles de temps glaciaires-interglaciaires, et sont constamment plus élevés pendant les périodes chaudes du passé, ce qui indique une forte sensibilité climatique (voir encadré 2.1). Les travaux de modélisation suggèrent que le cycle du carbone a contribué à mondialiser et à amplifier les changements dans le forçage climatique, qui rythment les oscillations climatiques passées.

Les carottes de glace permettent d'étudier la relation entre les variations de température et celles du CO_2 dans le passé. Par exemple, des recherches récentes ont montré que, lors de la dernière déglaciation, l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère a commencé plusieurs siècles *avant* le réchauffement global détecté dans les données. Cela soutient l'idée que le CO_2 agit comme un *amplificateur* du réchauffement climatique : sa présence accrue dans l'atmosphère renforce le réchauffement déjà amorcé par d'autres mécanismes⁸.

3. Modèles, incertitudes, projections

Les modèles climatiques sont des outils essentiels pour explorer la dynamique du système climatique de la Terre et pour prévoir l'évolution du climat en réponse à différents facteurs. Ils simulent les interactions entre les différentes composantes du système climatique, notamment l'atmosphère, les océans, les surfaces terrestres et la cryosphère, à l'aide d'équations mathématiques résolues par des méthodes numériques.

3.1 Concepts de base

Au cœur de ces modèles se trouvent les équations primitives qui décrivent les principes physiques fondamentaux tels que la conservation de la quantité de mouvement, de l'énergie et de la masse. Les *équations de Navier-Stokes*, par exemple, régissent le mouvement des fluides dans l'atmosphère et les océans. Les équations de ce type sont très complexes et ne peuvent être résolues analytiquement. Elles sont donc discrétisées, c'est-à-dire que l'espace et le temps sont divisés en petites portions, en permettant une résolution numérique, et calculées sur une grille tridimensionnelle qui divise la planète en petites cellules (figure 3.1). La résolution de cette grille, c'est-à-dire la longueur du côté de chaque cellule, détermine le niveau de détail du modèle. Les modèles climatiques mondiaux fonctionnent généralement à des résolutions d'environ 200 km, tandis que les modèles climatiques régionaux se concentrent sur des zones plus petites avec des résolutions plus fines d'environ 50 km, car les possibilités de calcul s'améliorent alors.

Paramétrisation

Les modèles climatiques ne peuvent pas reproduire explicitement tous les processus pertinents (étant donné la complexité et la nature multi-échelle du système climatique). Par exemple, et ce n'est qu'un exemple possible, la formation des nuages, les flux d'air turbulents et l'échange d'énergie et d'humidité entre la surface et l'atmosphère peuvent se produire à des échelles plus petites que la résolution de la grille. Pour y remédier, les modèles utilisent une technique appelée *paramétrisation*, dans laquelle les processus sont représentés par des relations simplifiées qui les relient à des variables mieux connues. Un exemple de paramétrisation dans les modèles climatiques concerne les courants océaniques. Les modèles ne peuvent pas simuler précisément chaque mouvement de l'eau à petite échelle, comme les turbulences dans les courants. À la place, ils utilisent des relations simplifiées pour décrire ces mouvements, en reliant des variables comme la température de l'eau, la salinité et la vitesse des courants à l'échelle large, ce qui permet d'obtenir une estimation plus générale.

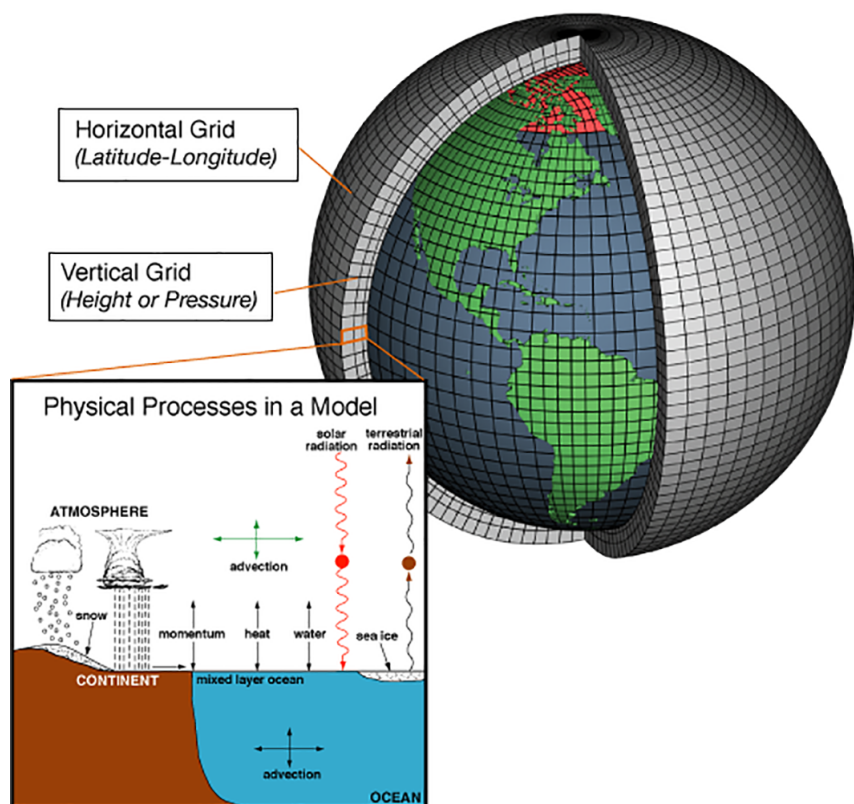


Fig. 3.1 Exemple de grille pour un modèle à l'échelle globale¹.

La paramétrisation devient nécessaire lorsque (i) les processus se produisent à une échelle temporelle ou spatiale trop petite pour être résolue par la grille du modèle ; (ii) leur fonctionnement n'est pas suffisamment compris ; ou (iii) leur complexité est telle que leur simulation directe serait trop coûteuse en termes de calculs. En effet, certains processus exigent un grand nombre de calculs à chaque étape, ce qui rend leur prise en compte sur de longues périodes ou à grande échelle trop difficile à gérer d'un point de vue numérique.

Modules des modèles climatiques

Les modèles climatiques modernes sont composés de plusieurs **modules** interconnectés qui simulent le comportement des composantes spécifiques du système terrestre que nous avons présentées précédemment (voir chapitre 1).

Le module atmosphérique, qui est au cœur de nombreux modèles, fonctionne de la même manière que les systèmes de prévisions météorologiques, mais sur des échelles de temps beaucoup plus longues. Le module océanique saisit des processus plus lents et à plus grande échelle, tels que les courants et la distribution de la

chaleur, bien qu'il soit confronté à des défis dus à des données d'observation limitées, en particulier dans les profondeurs de l'océan. Le module « surface terrestre » se concentre sur des processus tels que la dynamique de la végétation et l'humidité du sol, qui sont essentiels pour comprendre les échanges d'eau, d'énergie et de carbone. Enfin, le module cryosphère simule les interactions entre les nappes glaciaires, les glaciers et la glace de mer, y compris leur impact sur l'équilibre énergétique et les changements du niveau de la mer (figure 3.2).

The World in Global Climate Models

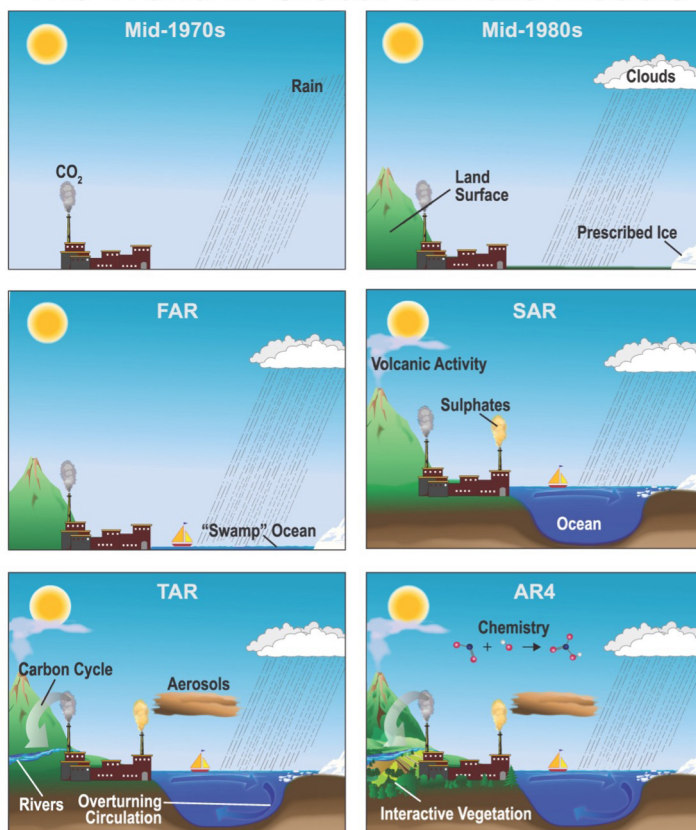


Fig. 3.2 Évolution des modèles climatiques illustrée schématiquement².

Conditions aux limites

En simplifiant à l'extrême, nous pouvons imaginer un modèle climatique comme un modèle de prévision météorologique, mais adapté pour travailler à l'échelle des décennies et des siècles plutôt que des jours/semaines/saisons. Cette différence est toutefois importante, car alors qu'un modèle de prévision météorologique doit être précis dans l'espace et dans le temps, un modèle climatique doit fournir des

statistiques générales plutôt que des valeurs exactes. C'est la raison pour laquelle les modèles de prévision météorologique sont sensibles à leurs conditions initiales (parfois nommée « effet papillon ») : ils ont besoin d'excellentes données d'entrée et, en raison de leur nature chaotique, sont incapables de fournir des résultats exacts significatifs sur des horizons de plus de quelques jours. Les modèles climatiques, au contraire, sont sensibles aux **conditions aux limites**, c'est-à-dire aux paramètres prédéfinis qui déterminent comment le système modélisé va se comporter. Plutôt que de disposer d'informations exactes sur l'état initial, ils dépendent de la qualité de la définition des conditions contraignantes (conditions aux limites) qui vont influencer les projections futures. Par exemple, pour le réchauffement climatique, certaines de ces conditions limites sont données par les scénarios d'émissions, qui eux-mêmes dépendent des choix politiques et énergétiques à venir dans les prochaines décennies.

3.2 Incertitudes et prévisions

Sources d'incertitude et variabilité

L'**incertitude** est un aspect inhérent à la modélisation du climat et elle doit être comprise et acceptée (figure 3.3). Tout d'abord, il existe des incertitudes dans la manière dont les modèles représentent les processus physiques du système climatique et interagissent avec les forçages (incertitude du modèle, en bleu dans la figure 3.3). Ensuite, les forçages à l'origine du changement climatique, tels que les émissions de GES, l'activité volcanique et les variations du rayonnement solaire, sont variables, en particulier lorsqu'il s'agit de faire des projections à long terme (incertitude du forçage, en vert). Enfin, la variabilité naturelle du système climatique lui-même ajoute un élément d'imprévisibilité (variabilité naturelle du système climatique, en orange).

Malgré ces défis, les modèles climatiques sont devenus de plus en plus sophistiqués. Ceux du système Terre (ou Earth System Models, ESM), par exemple, intègrent les cycles biogéochimiques tels que ceux du carbone et du soufre, ce qui les rend plus complets que les modèles précédents. Ces progrès permettent aux scientifiques de mieux comprendre les mécanismes de rétroaction et de prévoir l'avenir du climat en fonction de différents scénarios socio-économiques et d'émissions (voir encadré 3.1).

Les modèles climatiques jouent un rôle essentiel dans la compréhension des causes du réchauffement global observé. En comparant différentes simulations, ils permettent de distinguer les influences naturelles et anthropiques sur l'évolution des températures. Une approche courante consiste à réaliser deux types de simulations (i) l'une prenant en compte uniquement les facteurs naturels, tels que les variations de l'activité solaire, les éruptions volcaniques et la variabilité interne du climat ; (ii) l'autre intégrant à la fois ces facteurs naturels et les influences humaines, notamment les émissions de GES, les aérosols et les modifications de l'usage des terres (voir figure 3.4).

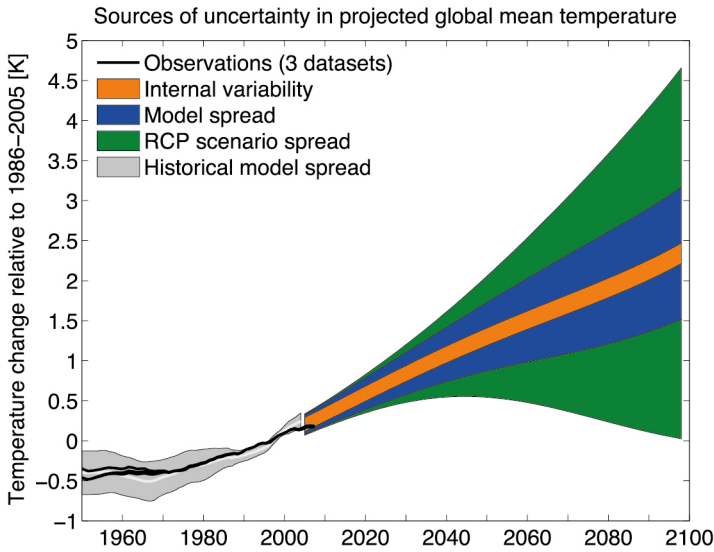
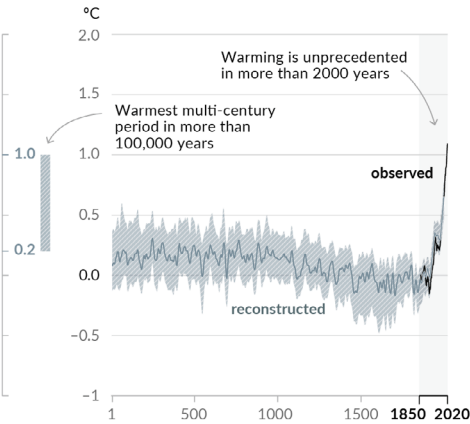


Fig. 3.3 Projections de la température moyenne de surface sur une décennie jusqu'en 2100, accompagnées d'une quantification de l'incertitude provenant de la variabilité interne (orange), de la dispersion des modèles (bleu) et de la dispersion des scénarios RCP (vert)³.

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900

(a) Change in global surface temperature (decadal average) as **reconstructed** (1-2000) and **observed** (1850-2020)



(b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)

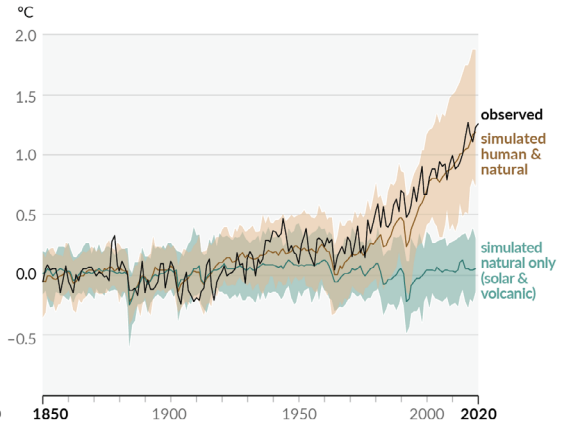


Fig. 3.4 Influence humaine sur le climat, selon les modèles climatiques et les observations⁴.

Les résultats montrent que les modèles basés uniquement sur les causes naturelles ne parviennent pas à reproduire la hausse des températures observée depuis le XX^e siècle. En revanche, lorsque les simulations incluent les influences humaines, elles correspondent étroitement aux observations réelles. Cette comparaison met en évidence le rôle déterminant des activités humaines dans le réchauffement

climatique. Sans l'effet des GES émis par les humains, l'ampleur et la rapidité du réchauffement ne peuvent pas s'expliquer par les facteurs naturels d'évolution du climat.

Prévisions/projections

Les scénarios futurs produits par les modèles climatiques sont généralement basés sur des hypothèses variables concernant le développement socio-économique, l'utilisation de l'énergie et les mesures politiques. Le Giec utilise une série de scénarios connus sous le nom de **trajectoires socio-économiques partagées** (Shared Socio-economic Pathways [SSP]). Ces scénarios couvrent des futurs potentiels allant des trajectoires à faibles émissions, où le réchauffement de la planète est limité à 1,5 °C à 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels environ, aux trajectoires à fortes émissions, où le réchauffement dépasse 4 °C.

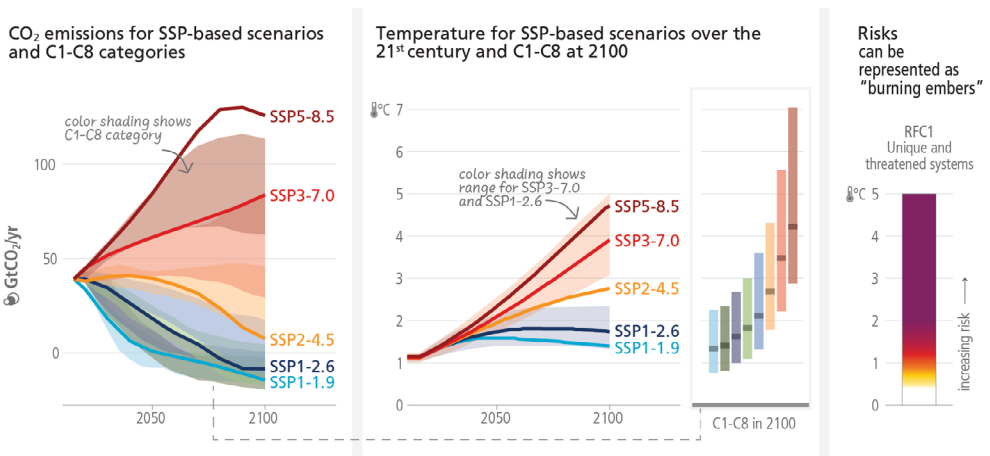


Fig. 3.5 Émissions de CO₂ et changements de température selon les différents scénarios⁵.

Dans les scénarios à fortes émissions, les modèles prévoient une augmentation significative des températures mondiales, des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses, et une fonte accélérée des glaces polaires, entraînant une élévation du niveau de la mer. Les régimes de précipitations devraient également changer, certaines régions connaissant de graves sécheresses tandis que d'autres sont confrontées à une augmentation des inondations. En revanche, les scénarios à faibles émissions suggèrent une réponse climatique plus modérée, avec des augmentations de température plus faibles et des impacts moins sévères sur les écosystèmes et les systèmes humains. L'un des aspects les plus préoccupants des scénarios à fortes émissions est le risque de franchissement de **points de basculement climatiques**. Il s'agit de seuils au-delà desquels certaines parties du système climatique pourraient changer

de manière irréversible, comme l'effondrement de grandes nappes glaciaires ou le dépérissement de la forêt amazonienne. Bien que les seuils exacts soient incertains, les modèles soulignent l'importance de limiter les émissions pour éviter de déclencher de tels événements (voir section 3.3).

Encadré 3.1 Qu'est-ce que les scénarios RCP et SSP du Giec ?

Les scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) et SSP sont des outils développés par le Giec pour modéliser les futurs climatiques en fonction des émissions de GES et des trajectoires socio-économiques.

Les **RCP**, introduits dans le cinquième rapport du Giec⁶, définissent des trajectoires d'émissions conduisant à différents niveaux de forçage radiatif à l'horizon 2100 (en W/m^2). Par exemple, le RCP2.6 correspond à un scénario de forte réduction des émissions, tandis que le RCP8.5 représente un monde où elles continuent d'augmenter fortement. Le RCP4.5, quant à lui, représente un scénario intermédiaire avec une réduction modérée des émissions.

Les **SSP**, développés pour le sixième rapport⁷, décrivent cinq trajectoires socio-économiques qui influencent les émissions et la capacité d'adaptation des sociétés.

- **SSP1 (voie de la durabilité)** : un monde coopératif, une réduction des inégalités et une transition énergétique rapide.
- **SSP2 (scénario intermédiaire)** : une poursuite des tendances actuelles avec des efforts modérés pour la durabilité.
- **SSP3 (régionalisation)** : un peu de coopération internationale, une forte dépendance aux combustibles fossiles et inégalités croissantes.
- **SSP4 (inégalités accentuées)** : un développement technologique avancé pour certaines régions, mais avec de fortes inégalités sociales et économiques.
- **SSP5 (développement fossile intensif)** : une forte croissance économique basée sur les énergies fossiles, avec une hausse rapide des émissions de CO_2 .

Les SSP prennent en compte des facteurs socio-économiques tels que les projections démographiques, économiques ou de consommation d'énergie, ainsi que les développements possibles des technologies et des politiques sociales ou de la coopération entre les pays. Certains SSP auront donc des affinités plus ou moins grandes avec certaines trajectoires d'émissions définies par les RCP. Le SSP5 par exemple est fréquemment associé au RCP8.5 car il décrit un monde dans lequel le système énergétique reste fortement dépendant des énergies fossiles (voir SSP5-RCP8.5 dans la figure 3.5)⁸.

3.3 Impacts physico-chimiques du changement climatique

Le changement climatique modifie les équilibres physiques et chimiques de la planète, affectant toutes les composantes du système climatique. La modélisation du système climatique et les scénarios SSP/RCP permettent de mieux comprendre les changements actuels et leurs effets dans le futur.

Augmentation de la température

Le changement climatique se traduit par une augmentation des températures moyennes à l'échelle globale estimée à environ 1,3 °C à 1,4 °C depuis l'ère préindustrielle (1850-1900). Comme évoqué précédemment, cette hausse est principalement attribuée à l'accumulation des GES dans l'atmosphère, en premier lieu le CO₂, modulée par des phénomènes climatiques tels qu'El Niño. L'augmentation de la température atmosphérique entraîne également un réchauffement des océans dont la température moyenne a augmenté d'environ 0,9 °C depuis 1901. Bien que le réchauffement climatique soit global en raison de l'augmentation de l'effet de serre, certaines régions, dont les régions polaires et les zones montagneuses, notamment les Alpes, se réchauffent à un rythme plus soutenu, un phénomène décrit comme l'amplification polaire. En effet, les régions arctiques et antarctiques se réchauffent deux à quatre fois plus rapidement que la moyenne planétaire, en raison de la diminution de l'albédo et d'une modification de la circulation océanique et atmosphérique. Le réchauffement climatique tend également à accentuer les contrastes régionaux, perturbant les équilibres climatiques. Cela peut entraîner des phénomènes extrêmes comme des vagues de chaleur ou, paradoxalement, des épisodes hivernaux plus rigoureux à des latitudes plus tempérées.

Il convient également de souligner que le réchauffement accéléré des régions polaires favorise la fonte du pergélisol – ces sols gelés en permanence –, entraînant la libération de CH₄ et du CO₂ dans l'atmosphère. Bien que l'ampleur de ce phénomène reste encore incertaine, il est considéré comme un potentiel point de bascule majeur du système climatique, susceptible d'amplifier fortement le réchauffement global. Les modèles climatiques montrent que pour chaque degré de réchauffement supplémentaire entre 14-175 Gt d'équivalent CO₂ pourraient être libérés dans l'atmosphère. En comparaison, les activités humaines ont émis environ 41 Gt CO₂ en 2024, ce qui donne un ordre de grandeur du risque que représente ce réservoir de carbone.

Les projections d'augmentation des températures mondiales au cours des prochaines décennies dépendent des scénarios d'émission de GES envisagés (voir encadré 3.1). Les augmentations de températures moyennes prévues d'ici à 2081-2100 varient entre 1,4 °C, pour le scénario SSP1-1.9, à plus de 4 °C, pour le scénario SSP5-8.5. À noter que, selon les Nations unies, les politiques climatiques actuelles conduiraient à une augmentation de la température mondiale de 3,1 °C d'ici la fin

du siècle, dépassant ainsi largement l'objectif de 1,5 °C fixé par l'accord de Paris (voir section 9.3). Ce constat souligne l'insuffisance des engagements actuels et l'urgence d'une action climatique renforcée à l'échelle mondiale.

Élévation du niveau de la mer

Le changement climatique entraîne également une hausse continue du niveau moyen des océans. Depuis 1900, le niveau marin moyen a augmenté d'environ 20 cm, une tendance qui s'est accélérée au fil du temps, passant en moyenne de 1,3 mm par an entre 1901 et 1971 à 1,9 mm par an entre 1971 et 2006, et a plus récemment doublé pour atteindre 3,7 mm par an. Cette montée des eaux océaniques s'explique par deux facteurs principaux. D'une part, la dilatation thermique des océans – l'eau se dilate et occupe un plus grand volume lorsque sa température augmente – représente environ 50 % de l'élévation du niveau des océans depuis 1900. La fonte accélérée des glaciers et des calottes glaciaires contribue directement à l'augmentation du volume océanique. À elle seule, la fonte de la calotte groenlandaise est responsable d'environ 0,7 mm par an de l'élévation du niveau des mers.

La montée du niveau marin a de nombreuses conséquences, parmi lesquelles l'augmentation des inondations des zones côtières, l'érosion accrue du littoral et la salinisation croissante des terres agricoles, compromettant leur productivité. Il s'agit de l'un des impacts les plus préoccupants du changement climatique car ce phénomène est irréversible à l'échelle humaine et pourrait perdurer pendant des siècles même si les émissions de CO₂ devaient cesser immédiatement. Par ailleurs, les mesures techniques de protection des zones côtières telles que le projet Mose⁹ à Venise sont souvent complexes à mettre en œuvre, extrêmement coûteuses et parfois insuffisantes face à l'ampleur des projections futures.

Selon le sixième rapport d'évaluation du Giec publié en 2021, l'élévation du niveau moyen des océans d'ici 2100, par rapport à la période 1900 est estimée entre 0,28 m pour un scénario à faibles émissions de GES à plus de 1 m dans le scénario le plus pessimiste. Ces projections pourraient être revues à la hausse si des phénomènes tels que la fonte accélérée des inlandsis groenlandais et de l'Antarctique devaient se produire. Les études paléoclimatiques nous informent en effet que durant le Pliocène (il y a environ 3 Ma), l'intervalle climatique durant lequel les concentrations de CO₂ étaient comparables à celles d'aujourd'hui (420-450 ppm), le niveau moyen des océans était 10 à 25 m plus élevé à celui que nous connaissons actuellement. Cela s'expliquerait notamment par les fontes, quasi totale, de l'inlandsis du Groenland et, partielle, de la calotte antarctique occidentale. Le niveau marin élevé lors du Pliocène illustre le lien étroit entre température globale, fonte des calottes glaciaires et hausse du niveau des mers. Il suggère aussi que le changement climatique qui a cours pourrait conduire à des élévations comparables sur le long terme, mettant ainsi en péril les zones côtières densément peuplées à travers le monde.

Modification du régime des précipitations, événements climatiques extrêmes

Le changement climatique modifie les régimes de précipitations à l'échelle mondiale, entraînant des perturbations importantes du cycle hydrologique. L'air plus chaud peut en effet contenir une plus grande quantité de vapeur d'eau, ce qui entraîne des précipitations plus intenses, augmentant le risque d'inondations soudaines, notamment dans les régions tropicales. Les cyclones, ouragans et tempêtes tropicales deviennent plus puissants, alimentés par une évaporation accrue des océans, causant des dégâts plus importants. Dans les zones montagneuses, la fonte précoce des glaciers entraîne une augmentation temporaire des débits des rivières et des fleuves, suivie d'une pénurie d'eau à long terme. Les projections pour les prochaines décennies indiquent des modifications significatives des régimes de précipitations et une augmentation des événements climatiques extrêmes en Suisse. En particulier, les précipitations hivernales devraient augmenter alors que les précipitations estivales devraient diminuer. Bien que la quantité annuelle des précipitations ne soit pas amenée à changer de manière substantielle, la saisonnalité plus marquée de la disponibilité des ressources hydriques pourrait entraîner des périodes de sécheresse plus fréquentes et prolongées en été, ainsi qu'un risque d'inondations et de glissements de terrain plus élevé en hiver.

Les régions subtropicales (Méditerranée, Afrique du Nord) connaissent une baisse des précipitations, engendrant des épisodes de sécheresse plus longs et plus intenses. Des sécheresses prolongées et des précipitations plus irrégulières exposent les cultures au stress hydrique, réduisent les rendements agricoles, augmentant ainsi le risque de pénuries alimentaires. En outre, des précipitations plus irrégulières rendent l'approvisionnement en eau potable moins prévisible. Le bassin méditerranéen se réchauffe en effet 20 % plus rapidement que la moyenne globale. Les prévisions indiquent une augmentation de 10 à 30 % de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes d'ici le milieu du XXI^e siècle.

La modification du régime des précipitations est une des conséquences majeures du changement climatique, nécessitant une adaptation urgente afin de limiter au mieux ses impacts sur les sociétés humaines et les écosystèmes (voir chapitres 6 et 7).

Acidifications des océans

L'**acidification** des océans est un phénomène lié à l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère, qui modifie la chimie des océans, menaçant ainsi certains écosystèmes marins. Les océans absorbent environ un quart des émissions de CO₂ anthropique (voir section 2.2). Une fois dissous, ce dernier réagit avec l'eau de mer pour former de l'acide carbonique qui se dissocie en ions hydrogène (H⁺) et bicarbonate. L'augmentation des ions H⁺ entraîne une diminution du pH des océans (il est passé de 8.2 à 8.1, depuis l'ère préindustrielle), rendant les eaux plus acides. Leur acidification rend le processus de calcification, essentiel à la survie de nombreux organismes marins (notamment les coraux, certains mollusques et crustacés,

le plancton calcifiant), plus difficile, conduisant à une baisse de la biodiversité marine ainsi qu'à des déséquilibres dans les écosystèmes. L'acidification accrue des mers combinée à l'augmentation des températures océaniques affaiblit encore plus certains écosystèmes (on pense notamment au blanchissement corallien) et affecte la capacité des océans à absorber le CO_2 , ce qui pourrait à terme aggraver l'effet de serre. Leur acidification constitue une menace irréversible (à court terme) et silencieuse du changement climatique, nécessitant des actions immédiates pour limiter les émissions de CO_2 .

Selon le sixième rapport d'évaluation du Giec, l'acidification des océans devrait se poursuivre (en raison de la relation directe entre concentrations de CO_2 atmosphérique et pH des eaux de surface) avec une baisse du pH des océans (-0.16 à -0.44 à l'horizon 2080-2099 selon les scénarios) et atteindre un niveau inédit depuis au moins 2 Ma.

Points de bascule

Un **point de bascule**, ou point de basculement (*tipping point*), désigne un seuil critique au-delà duquel un système climatique subit des changements significatifs, souvent irréversibles, modifiant qualitativement son état ou son évolution.

Les points de bascule climatiques (PBC) ont été réévalués récemment. Une étude¹⁰ a identifié 16 éléments du système terrestre susceptibles de basculer au-delà de seuils critiques de réchauffement, répartis en « éléments de bascule globaux » et « éléments de bascule régionaux » dont 10 abiotiques (figure 3.6).

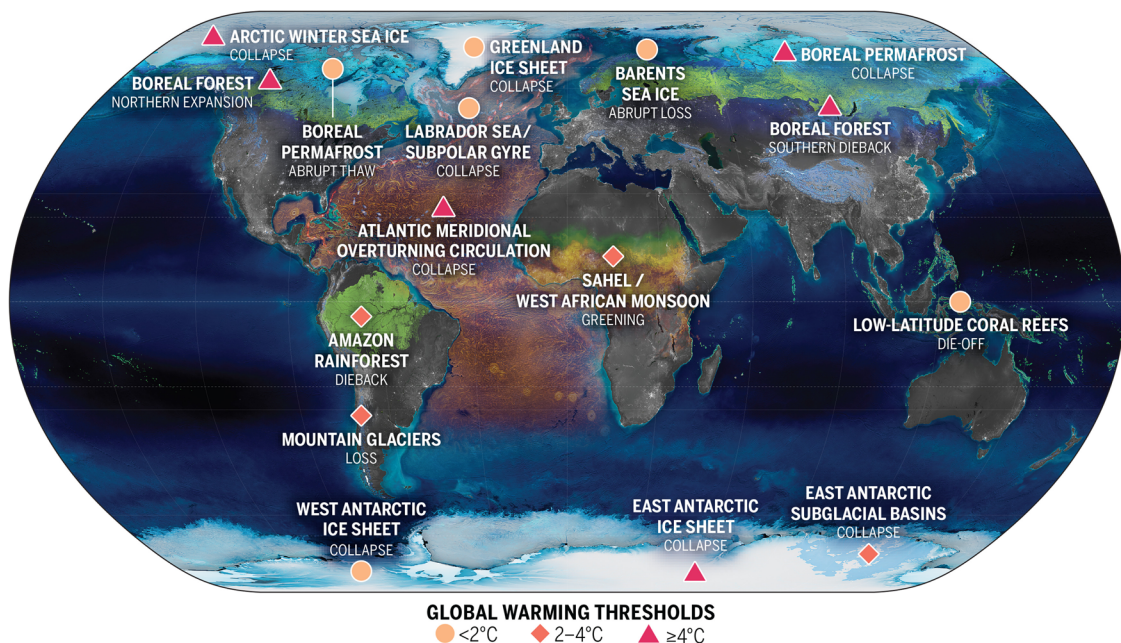


Fig. 3.6 Localisation des principaux points de bascule¹¹.

L'étude révèle que le réchauffement climatique actuel, estimé environ 1,2 °C au-dessus des niveaux préindustriels (1,5 °C pour 2024 selon l'OMM), pourrait déjà avoir placé la Terre dans une zone de danger pour certains PBC. Parmi les 16 identifiés, cinq pourraient être déclenchés aux températures actuelles : la fonte irréversible des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique occidental, le dégel abrupt du pergélisol, l'effondrement de la convection dans la mer du Labrador et la mort massive des récifs coralliens tropicaux (voir chapitre 7).

Les auteurs estiment que le risque de déclencher ces PBC augmente significativement entre 1,5 °C et 2 °C de réchauffement, seuils correspondant aux limites de l'accord de Paris. Au-delà de 2 °C, le risque de franchir plusieurs PBC s'accroît davantage, rendant les trajectoires actuelles de réchauffement particulièrement préoccupantes.

PARTIE 2

Impact du changement climatique sur les écosystèmes

Christophe Randin

4. Changement climatique et autres composantes des changements globaux

Le changement climatique a désormais un impact sur la quasi-totalité des écosystèmes terrestres, marins et aquatiques de la planète (voir chapitre 6). Même si les modifications du climat ne sont pas encore les facteurs les plus importants des changements globaux, elles le seront certainement pour la fin du siècle, avec des conséquences en cascade, de l'échelle des organismes jusqu'à celle des écosystèmes et de leurs services à l'humain.

L'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (en anglais Millennium Ecosystem Assessment [MEA]¹) est une synthèse publiée en 2005 à la demande des Nations unies qui avait pour objectif d'évaluer, sur des bases scientifiques, l'ampleur et les conséquences des modifications subies par les écosystèmes dont dépendent la survie et le bien-être des humains. Le MEA identifie des facteurs naturels ou anthropiques qui provoquent directement ou indirectement un changement dans un écosystème. Parmi les quatre facteurs directs les plus importants identifiés dans la synthèse du MEA figure le changement climatique. Toujours selon le MEA, le changement climatique est aussi la dimension la plus critique des changements globaux par sa contribution croissante aux changements induits mais aussi par le fait qu'il agit comme un « amplificateur » des pressions existantes sur les écosystèmes et les sociétés humaines.

Depuis le MEA, notre compréhension de la biodiversité et des écosystèmes, mais aussi de leur importance pour la qualité de vie des humains, a sensiblement progressé. Cependant, et malgré des objectifs de développement durable (ODD) qui visent à limiter le réchauffement climatique et ses effets et l'accord de Paris, le rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques² en 2019 par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES [Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services], équivalent du Giec pour la biodiversité) place désormais le changement climatique comme la troisième cause d'érosion de la biodiversité. Celle-ci continue de décliner, la dégradation des écosystèmes se poursuit et bon nombre des services ou contributions de la nature aux sociétés humaines sont menacés.

4.1 Les écosystèmes

Qu'est-ce qu'un écosystème ?

Afin de bien comprendre les mécanismes qui sous-tendent les impacts du changement climatique sur les écosystèmes, quelques définitions sont nécessaires en préambule car la notion d'**écosystème** est souvent galvaudée.

Encadré 4.1 Qu'est-ce qu'un écosystème ?

Un **écosystème** caractérise un espace géographique plus ou moins défini, relativement homogène et permettant le développement d'un ensemble d'organismes vivants. Un écosystème se compose d'un biotope, un environnement avec certaines caractéristiques physicochimiques typiques telles que les conditions climatiques, la géologie et l'hydrologie, et d'une biocénose, l'ensemble des êtres vivants interagissant entre eux et avec le biotope. Les écosystèmes peuvent être imbriqués à une échelle géographique supérieure dans d'autres écosystèmes tels que les biomes. On reconnaît habituellement 20 **biomes** terrestres globaux (figure 4.1), qui sont les principaux types d'écosystèmes à l'échelle globale, tels que les forêts tempérées ou tropicales, les steppes, les savanes, les mangroves ou le désert. Contrairement à certains écosystèmes entièrement naturels (par exemple certaines zones de toundra dans l'Arctique) qui sont peu ou pas touchés par l'humain, un écosystème semi-naturel est un milieu qui a été modifié ou influencé par l'humain mais qui conserve une grande partie de ses caractéristiques naturelles. Il nécessite peu d'interventions humaines pour se maintenir et sa biodiversité reste relativement riche. Les **prairies permanentes** utilisées pour le pâturage sont entretenues par l'humain (fauche ou pâturage) mais conservent une flore et une faune variées. Un écosystème artificiel est entièrement créé et contrôlé par l'humain. Il a une biodiversité limitée et dépend d'interventions humaines constantes (irrigation, engrais, pesticides) pour fonctionner. Les champs de blé, de maïs ou de soja cultivés sur de grandes surfaces avec des techniques industrielles (machines, engrais chimiques, pesticides) sont des monocultures qui font partie des écosystèmes artificiels.

La **biodiversité** désigne l'ensemble des êtres vivants et intègre aussi la diversité des écosystèmes, des espèces et des gènes dans l'espace et dans le temps, ainsi que les interactions au sein de ces niveaux d'organisation, entre eux et avec le biotope.

Un écosystème n'est pas figé dans le temps. Il possède une gamme de variations et il est maintenu par des flux de matière et d'énergie. Cet équilibre peut être perturbé et la résilience d'un écosystème est définie comme sa capacité à se réorganiser après une perturbation pour revenir à une organisation et à des fonctions comparables.

L'humain fait partie intégrante des écosystèmes. Les écosystèmes semi-naturels ont subi des interventions telles que l'agriculture, la gestion forestière, ou le pâturage, tout en conservant une grande partie de leur biodiversité et de leurs fonctions. Des concepts similaires à ceux des écosystèmes terrestres peuvent être appliqués aux écosystèmes marins comme les récifs coralliens et d'eau douce tels que les fleuves et les deltas.

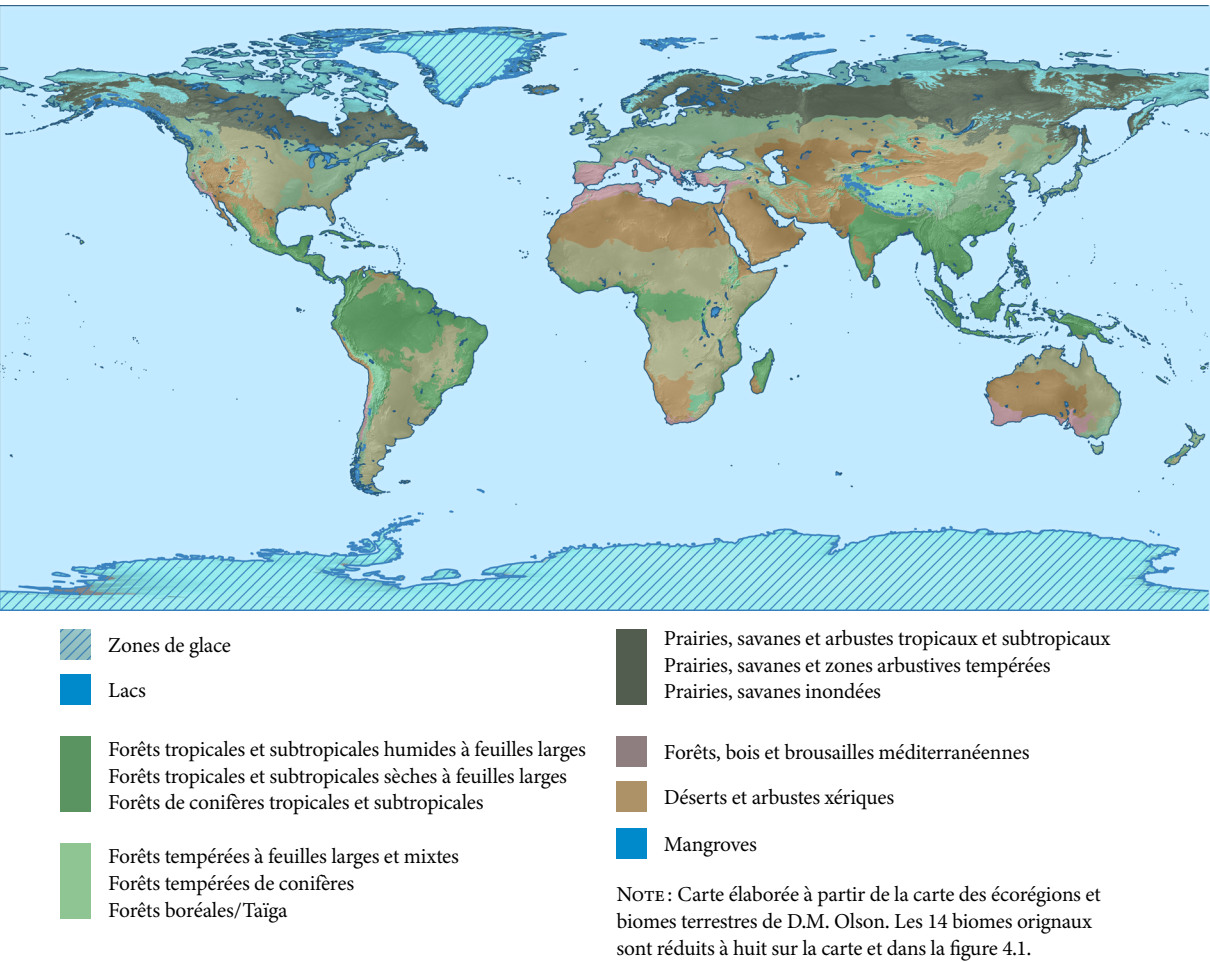


Fig. 4.1 Distribution géographique des principaux biomes à l'échelle mondiale³.

Fonctions et services des écosystèmes

Les **fonctions d'un écosystème** sont essentielles pour fournir des **services écosystémiques** aux humains (figure 4.2). La biodiversité (diversité biologique) est un facteur clé pour maintenir la productivité et la stabilité des écosystèmes, pour moduler les mouvements et les flux de nutriments, de matières et d'énergie à travers ces écosystèmes, qui sont tous des éléments cruciaux des **processus** et **fonctions** des

écosystèmes. Ceux-ci peuvent contribuer aux **services écosystémiques**, mais ils ne sont pas synonymes. Les processus et fonctions des écosystèmes décrivent les relations biophysiques entre composantes d'un écosystème et existent indépendamment du fait que l'humain en bénéficie ou non. Les services écosystémiques, quant à eux, n'existent que s'ils contribuent au bien-être de l'humain. Contrairement aux **services écosystémiques** qui sont les bénéfices que les humains tirent de la nature (comme la pollinisation, la régulation du climat ou la purification de l'eau), ces **services** ont un impact négatif sur l'humain comme la propagation de maladie : certains écosystèmes peuvent favoriser des maladies telles que le paludisme, pour lequel certains moustiques sont les vecteurs.

Encadré 4.2 Qu'est-ce que les services écosystémiques ?

Les services écosystémiques sont les avantages que les humains tirent des écosystèmes. Il s'agit notamment :

- des **services d'approvisionnement**, tels que la nourriture, l'eau, le bois et les fibres ou des organismes qui produisent des molécules bénéfiques pour la santé des humains ;
- des **services culturels**, tels que les loisirs ou la spiritualité et d'autres avantages non matériels ;
- des **services de régulation**, tels que la régulation des inondations, de la sécheresse, de la dégradation des sols et des maladies ;
- des **services de soutien**, tels que la formation des sols et le cycle des nutriments.

À travers le bien-être humain, les services écosystémiques contribuent par exemple à la liberté de choix et d'action, à la santé, à de bonnes relations sociales et à la sécurité. Les éléments constitutifs du bien-être, tels qu'ils sont vécus et perçus par les individus, dépendent cependant de la culture et des conditions écologiques locales⁴.

Ces deux concepts de fonctions et de services des écosystèmes sont importants dans le contexte du changement climatique car celui-ci modifie la biodiversité et les fonctions des écosystèmes, et par conséquent leurs services aux humains (figure 4.2). Il existe trois principales fonctions d'écosystèmes⁵ :

- stocks d'énergie et de matière : cela inclut les réserves de biomasse, de nutriments et d'autres matériaux essentiels dans un écosystème. Par exemple, les nutriments présents dans le sol ;
- flux d'énergie ou de traitement de la matière : ces fonctions concernent les processus dynamiques tels que la productivité primaire (la production de biomasse

par les plantes *via* la photosynthèse), la décomposition (la dégradation de la matière organique par les décomposeurs) et les cycles des nutriments (comme le cycle de l'azote ou du phosphore) ;

- stabilité des taux ou des stocks dans le temps : cela fait référence à la capacité d'un écosystème à maintenir ses fonctions malgré les perturbations. Par exemple, la résilience d'une forêt après un incendie ou la capacité d'un écosystème aquatique à se rétablir après une pollution.

4.2 Changement climatique, changements globaux et changements des écosystèmes

Dans leur cadre conceptuel (figure 4.2), le MEA comme l'IPBES identifient cinq facteurs des changements globaux qui ont un **impact direct** sur la biodiversité, les fonctions et les services des écosystèmes avec des répercussions significatives sur notre qualité de vie et le bien-être humain :

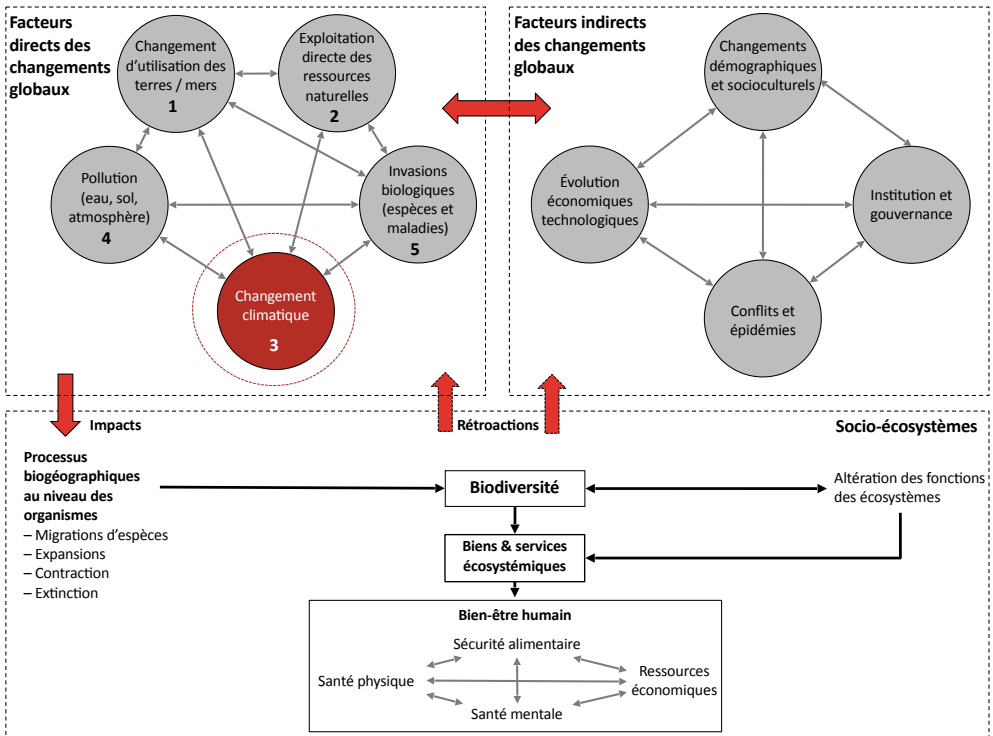
- **transformation des écosystèmes et changement d'utilisation des terres/mers** : la déforestation, l'urbanisation et l'agriculture et la pêche intensive modifient les habitats naturels, entraînant la perte de biodiversité et la perturbation des écosystèmes. Par exemple, la destruction des forêts tropicales réduit les habitats des espèces endémiques et perturbe les cycles de l'eau et du carbone. Pour les écosystèmes terrestres, les principaux facteurs directs d'évolution des services écosystémiques au cours des 70 dernières années ont été, dans l'ensemble, la modification de l'utilisation des sols (en particulier la conversion en terres cultivées) et l'application de nouvelles technologies (notamment la mécanisation des outils de production grâce à l'énergie tirée du pétrole abondant et bon marché), qui ont contribué de manière significative à l'augmentation de l'offre de services écosystémiques tels que l'alimentation, le bois et les fibres ;
- **exploitation directe et surexploitation des ressources** : la pêche excessive, la chasse et l'exploitation forestière non durable réduisent les populations d'espèces et perturbent les équilibres écologiques. La surexploitation est le facteur le plus important pour les écosystèmes marins ;
- **changement climatique** : les variations de température et de précipitations ainsi que les phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations, affectent les écosystèmes en modifiant la croissance et la distribution géographique des espèces, en perturbant leurs biotopes. Les récifs coralliens, par exemple, sont gravement menacés par le réchauffement des océans. Le changement climatique survenu au cours du siècle dernier a déjà eu un impact mesurable sur les écosystèmes. Les températures régionales plus élevées ont déjà affecté les écosystèmes dans l'ensemble des régions du monde. On observe des changements dans la répartition des espèces, la taille des populations et le calendrier des événements de reproduction ou de migration, ainsi qu'une augmentation de la fréquence des épidémies de ravageurs et de maladies, en particulier dans les systèmes forestiers ;

- pollution** : les polluants chimiques, plastiques et autres contaminants dégradent les sols, l'eau et l'air, nuisant à la santé des écosystèmes et des organismes qui y vivent. La pollution de l'eau par les pesticides et les engrais peut entraîner des zones mortes dans les océans ou l'eutrophisation des lacs et les dépôts d'azote atmosphérique peuvent modifier les écosystèmes des montagnes. La charge excessive en nutriments est apparue comme l'un des principaux facteurs directs de l'évolution des écosystèmes d'eau douce et marins. La production synthétique d'engrais azotés a été le moteur de l'augmentation notable de la production alimentaire au cours des sept dernières décennies. L'épandage d'azote a quintuplé depuis 1960, mais jusqu'à 50 % de l'engrais azoté épandu se perd dans l'environnement, selon la qualité de la gestion de l'épandage. Étant donné que la charge excessive en éléments nutritifs résulte en grande partie de l'application d'une quantité d'éléments nutritifs supérieure à celle que les cultures peuvent utiliser, elle nuit à la fois aux revenus des agriculteurs et à l'environnement. Une charge excessive d'azote peut entraîner la prolifération d'algues (souvent favorisée par le changement climatique), la diminution de l'eau potable, l'eutrophisation des écosystèmes d'eau douce (processus par lequel la croissance excessive des plantes épuise l'oxygène dans l'eau), l'hypoxie dans les écosystèmes marins côtiers (épuisement substantiel de l'oxygène entraînant la mort des poissons et autres animaux aquatiques), les émissions de protoxyde d'azote contribuant au changement climatique mondial et la pollution de l'air par les oxydes d'azote dans les zones urbaines ;
- invasions biologiques** : l'introduction d'espèces non indigènes peut déséquilibrer les écosystèmes par la compétition avec les espèces locales pour les ressources. Les espèces envahissantes peuvent également introduire des maladies et modifier les habitats, comme le cas du crabe vert qui menace les écosystèmes côtiers en Europe et en Amérique du Nord. Les invasions biologiques sont un phénomène mondial qui affecte les écosystèmes dans la plupart des grands biomes. Les mouvements d'organismes provoqués par l'humain, qu'ils soient délibérés ou accidentels, ont entraîné une modification massive de la distribution géographique d'espèces, dépassant les vitesses de changements survenus après le retrait de la dernière période glaciaire. Dans certains écosystèmes, les invasions d'organismes exotiques et de maladies ont entraîné l'extinction d'espèces indigènes ou une perte considérable de services écosystémiques. Aux États-Unis, par exemple, les invasions de plantes, d'animaux et de micro-organismes non indigènes seraient responsables de plus de 40 % du déclin des espèces indigènes figurant aujourd'hui sur la liste des espèces en danger ou menacées. Les menaces que les invasions biologiques font peser sur la biodiversité et sur les processus et fonctions au niveau des écosystèmes se traduisent directement par des conséquences économiques, telles que la perte de récoltes, de pêcheries, de forêts et de capacités de pâturage. Cependant, l'introduction d'espèces exotiques peut

également être bénéfique en termes de population humaine, la plupart des aliments étant produits à partir de plantes et d'animaux introduits (par exemple pomme de terre, maïs et mouton).

Les facteurs directs énumérés ci-dessus influencent sans équivoque les processus d'un écosystème (figure 4.2), mais des **facteurs indirects** influencent également les écosystèmes, de manière plus diffuse mais tout aussi importante :

- **changements démographiques et socioculturels** : la croissance de la population humaine et les migrations influencent la demande en ressources naturelles, augmentant la pression sur les écosystèmes. L'urbanisation rapide peut entraîner la modification ou la destruction des écosystèmes naturels et une augmentation de la pollution. Les attitudes et comportements humains envers l'environnement, influencés par l'éducation et la culture, jouent un rôle crucial dans la conservation ou la dégradation des écosystèmes ;
- **évolution économique et technologique** : le développement industriel et agricole intensifie l'exploitation des ressources naturelles, et la pollution et de fortes croissances économiques peuvent entraîner une augmentation de la consommation de ressources et des émissions de GES ;
- **institutions et gouvernances** : les décisions politiques peuvent soit protéger les écosystèmes par des lois environnementales strictes, soit les menacer par des politiques favorisant l'exploitation des ressources. Les subventions pour les énergies fossiles, par exemple, peuvent encourager la pollution et le changement climatique ;
- **conflits et épidémies** : les crises politiques, sociales et sanitaires peuvent perturber les interactions entre les humains et la nature. Les conflits armés et les instabilités politiques entraînent la destruction d'habitats, l'exploitation illégale des ressources naturelles et la perturbation des politiques de conservation. Les épidémies (ou pandémies) modifient les dynamiques sociales et économiques, souvent en affectant l'utilisation des terres, la consommation de ressources et les efforts de protection de la biodiversité. La République démocratique du Congo (RDC), par exemple, abrite une grande partie des forêts du bassin du Congo, l'un des écosystèmes les plus riches au monde. Cependant, les conflits armés dans la région ont entraîné la déforestation massive pour l'exploitation illégale du bois et des minerais, le braconnage intensif de la faune, notamment des gorilles et des éléphants, et le déplacement des populations, augmentant la pression sur les ressources naturelles. Toujours en RDC, la gestion des aires protégées et la surveillance de la faune ont été perturbées durant les épidémies d'Ebola, favorisant la chasse excessive et la transmission de maladies zoonotiques (causées par un virus, une bactérie ou des parasites, et transmises aux humains par des animaux).



NOTE : Les écosystèmes englobent ici le bien-être humain et sont désignés comme socio-écosystèmes.

Fig. 4.2 Les cinq facteurs directs des changements globaux provoquant des changements de la biodiversité et des écosystèmes par ordre de contribution actuelle (1 : contribution la plus élevée) et facteurs indirects⁶.

Changement dans les écosystèmes et bien-être humain

Les changements dans les écosystèmes causés par les facteurs directs, dont le changement climatique, et des facteurs indirects ont *in fine* des impacts sur le bien-être humain. Ces impacts sont classés en quatre grandes catégories :

- **santé physique** : la pollution de l'air et de l'eau peut entraîner des maladies respiratoires, des maladies cardiovasculaires et d'autres problèmes de santé. Par exemple, elle est responsable de millions de décès prématurés chaque année ;
- **sécurité alimentaire** : la dégradation des sols et la perte de biodiversité affectent la production agricole, menaçant la sécurité alimentaire. Les pollinisateurs, comme les abeilles, sont essentiels pour de nombreuses cultures et leur déclin peut avoir des conséquences graves sur l'approvisionnement alimentaire ;
- **santé mentale** : les environnements naturels ont des effets bénéfiques sur la santé mentale, réduisant le stress et améliorant le bien-être général. L'accès à des espaces verts est associé à une meilleure santé mentale et à une réduction des niveaux de stress ;

- **ressources économiques** : les écosystèmes fournissent des ressources essentielles comme l'eau, le bois et les produits alimentaires, influençant directement les économies locales et globales. La dégradation des écosystèmes peut entraîner des pertes économiques importantes, notamment pour les communautés dépendantes des ressources naturelles.

Interactions entre les facteurs directs des changements globaux

Les changements dans les services écosystémiques sont presque toujours causés par des interactions entre facteurs directs et indirects qui agissent dans le temps : la croissance de la population humaine et des revenus interagit avec les progrès technologiques, ce qui conduit à des changements d'utilisation du sol et à des changements climatiques. Les facteurs directs interagissent également de manière complexe. Les espèces invasives, souvent introduites par l'intensification des échanges commerciaux entre continents, peuvent perturber les écosystèmes indigènes, réduisant la biodiversité et modifiant les cycles biogéochimiques. Elles peuvent également être favorisées par les changements d'utilisation du sol et le changement climatique.

À l'inverse, les changements dans les services écosystémiques peuvent eux aussi avoir des impacts sur les composantes directes et indirectes des changements globaux. Par exemple, les changements dans les écosystèmes créent de nouvelles opportunités et contraintes pour l'utilisation des terres, induisent des modifications institutionnelles en réponse à l'évolution de l'environnement. Ces nouveaux usages des terres provoquent à leur tour des bouleversements institutionnels en réponse à la dégradation perçue et anticipée des ressources pour les humains, et entraînent des effets sociaux tels que des changements dans l'inégalité des revenus.

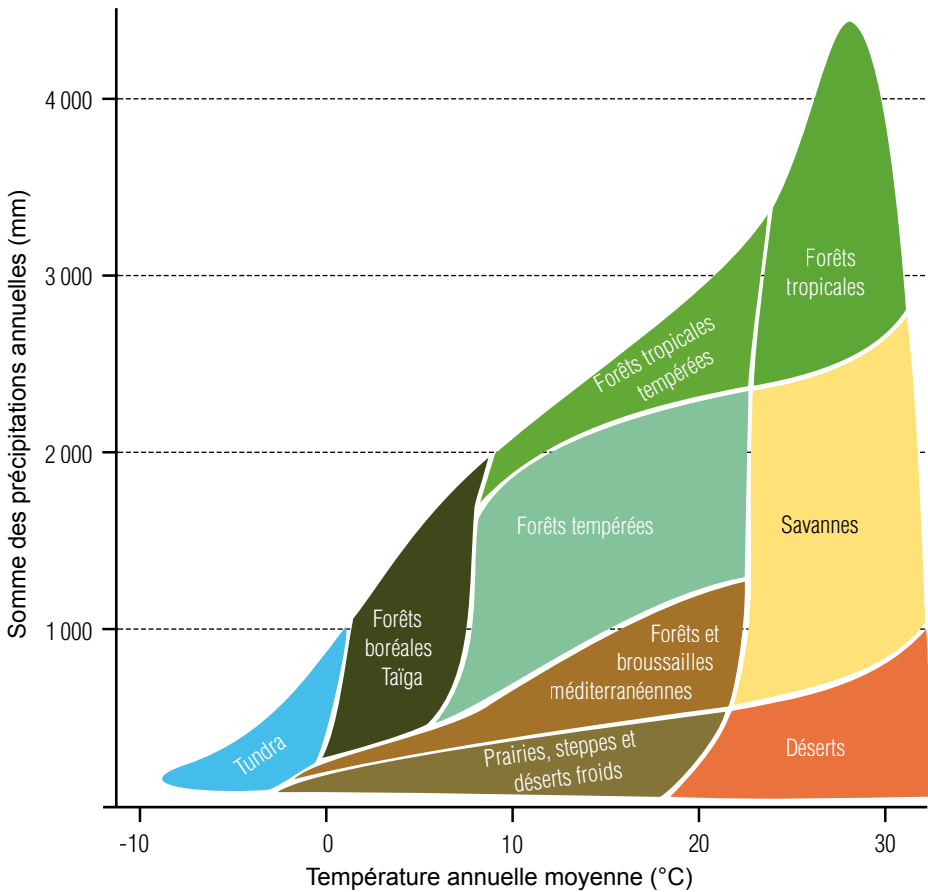
Les incendies de Los Angeles de janvier 2025 illustrent parfaitement les interactions complexes entre facteurs directs et indirects des changements globaux, avec le changement climatique, l'urbanisation, l'exploitation de l'eau et les invasions biologiques en toile de fond. Ces incendies ont ravagé 12 % de la ville de Los Angeles. Si les feux de forêt font partie intégrante de l'écosystème méditerranéen de la région, ils sont environ 25 % plus fréquents qu'à l'ère préindustrielle. Depuis 1970, leur saisonnalité s'est allongée de 105 jours en moyenne et les superficies brûlées sont six fois plus importantes. Deux événements climatiques majeurs ont transformé les collines et les forêts de Los Angeles. D'une part, l'augmentation des températures assèche les régions qui bénéficiaient auparavant d'un climat méditerranéen plus doux, comme la Californie du Sud. À mesure que ce changement se poursuit, les précipitations hivernales dans ces zones deviennent plus irrégulières. D'autre part et depuis les années 1980, le sud de la Californie connaît de plus en plus d'années humides, avec de la neige et des pluies anormalement élevées, suivies d'années arides, avec des pluies exceptionnellement faibles. Cette variabilité est désignée comme « coup de fouet hydroclimatique ». Elle est également accompagnée d'un phénomène naturel typique de l'hiver californien : les vents de Santa Ana. Parallèlement au changement

climatique et à l'augmentation de la variabilité du climat, le développement immobilier croissant dans ces zones d'interface urbain-rural a également exacerbé les risques d'incendie au cours des dernières décennies. La hausse de la fréquence et de l'intensité des feux de forêt, couplée à l'étalement urbain, provoque une transformation des écosystèmes californiens à long terme et favorise l'expansion d'espèces invasives dans ces milieux perturbés. Deux espèces de graminées invasives du genre *Bromus* (brome) se développent dans les espaces défrichés et augmentent le risque d'incendie. Une boucle de rétroaction positive se met alors en place car si les bromes brûlent, ils détruisent les nutriments du sol, freinant la recolonisation des espèces indigènes et augmentant la probabilité des surfaces brûlées d'être à nouveau envahies par les bromes. En détruisant la végétation, les feux imperméabilisent le sol. L'eau n'est donc plus absorbée et ruisselle en provoquant des coulées de boue lors de précipitations extrêmes. Cette dynamique causée par les interactions entre facteurs directs des changements globaux a des conséquences socio-économiques importantes : du fait de la fréquence accrue des incendies de forêt, les compagnies d'assurances refusent de couvrir davantage les résidents de ces zones à haut risque. Au total, quelque 100 000 Californiens ont perdu leur assurance depuis 2019.

Le changement climatique fait donc partie des cinq facteurs directs les plus importants des changements globaux, le troisième par ordre d'importance actuellement. Il se réfère spécifiquement aux modifications à long terme des conditions climatiques moyennes sur terre, principalement causées par les activités humaines telles que la production d'énergies fossiles, la déforestation et l'agriculture. Ces changements incluent le réchauffement climatique, les modifications des régimes de précipitations et l'augmentation des événements météorologiques extrêmes. En revanche, les changements globaux englobent des facteurs directs et indirects plus larges de transformations environnementales et socio-économiques qui affectent l'ensemble de la planète. Les changements globaux sont multifactoriels et multiscales, affectant divers aspects des écosystèmes et des sociétés humaines.

5. Relations entre climat et organismes

Le climat est le déterminant principal de la répartition géographique des écosystèmes terrestres à l'échelle globale les biomes, en agissant comme une contrainte environnementale, principalement pour la végétation qui les compose mais aussi pour la majorité des autres organismes¹. Les biomes terrestres se distinguent donc principalement les uns des autres par leur végétation prédominante et caractéristique. Ils sont essentiellement contraints par deux composantes du climat, la température et les précipitations (figure 5.1).



NOTE : Voir carte correspondante avec distribution des biomes sur la figure 4.1.
Distribution des biomes de Whittaker modifiée.

Fig. 5.1 Chacun des grands écosystèmes (biomes) de la planète se distingue par des températures et des précipitations caractéristiques².

Les températures et les précipitations varient à l'échelle mondiale en fonction de plusieurs facteurs et principalement la latitude. La température diminue de 10 °C tous les 1800 km en latitude vers les pôles. Une tendance identique est observée en altitude avec une diminution de 10 °C tous les 2000 à 2500 m de gain altitudinal. Sous l'équateur (0 ° de latitude) les températures restent élevées toute l'année (~ 25-30 °C). Dans les zones tempérées (30-66° de latitude), les températures sont modérées avec des saisons marquées. Par exemple, la moyenne annuelle sur le Plateau suisse est de 8 à 12 °C. Enfin, dans les régions polaires (66 ° à 90° de latitude), les températures peuvent descendre jusqu'à - 50 °C (en Antarctique).

Le régime de précipitation varie aussi fortement le long du gradient latitudinal. Ainsi sous l'équateur, les précipitations sont fortes et régulières (à l'instar des températures) tout au long de l'année (> 2000 mm) et causées par des ascendances d'air chaud et humide en continu dans la zone de convergence intertropicale. On y trouve des forêts tropicales composées d'arbres à feuilles persistantes (figure 5.1) mais aussi des espèces qui perdent leurs feuilles lorsque l'on s'éloigne de l'équateur (zones tropicales avec une ou deux saisons sèches entre 15° et 25° de latitude nord et sud). Sous les tropiques (30° de latitude nord et sud), les précipitations sont faibles (< 250 mm), ceci par la présence d'anticyclones et de descentes d'air sec sous ces latitudes. On y trouve des déserts comme le Sahara dans l'hémisphère nord et Atacama dans l'hémisphère sud. Dans les zones tempérées (> 30° et < 66° de latitude), les précipitations sont modérées (500 à 1000 mm) et régulées par la circulation de systèmes dépressionnaires et de fronts. La forêt tempérée décidue et mixte (forêt constituée à la fois de feuillus et de conifères) et la forêt boréale en Scandinavie sont les principales forêts en Europe en dehors du biome méditerranéen. Enfin, dans les régions polaires (> 66° de latitude) à l'intérieur des terres, les précipitations sont faibles (< 250 mm) car l'air froid et sec est incapable de retenir l'humidité. La toundra est le biome typique des régions polaires. La végétation rase de plantes herbacées, d'arbustes, de mousses et de lichens domine ces écosystèmes. Par la correspondance de la variation de la température en latitude et en altitude, on peut retrouver les mêmes biomes en latitude et en altitude (la taïga suivie de la toundra en montant en latitude et la forêt subalpine suivie de la végétation alpine en montant en altitude).

Les biomes azonaux sont des biomes qui ne dépendent pas uniquement du climat global d'une région, mais plutôt de facteurs locaux comme des facteurs édaphiques (liés à la nature du sol) et hydrologiques. Contrairement aux biomes zonaux qui suivent des bandes latitudinales (comme les forêts tropicales, les déserts ou la toundra, qui sont principalement déterminés par le climat), les biomes azonaux peuvent apparaître ponctuellement dans différentes zones climatiques. La présence des marais et tourbières dépend plus de l'hydrologie, de la topographie locale et parfois de la géologie que du climat. Les grottes et écosystèmes souterrains ne sont pas influencés par le climat externe mais par les conditions internes spécifiques

(obscurité, humidité, température constante). Les rivières et fleuves traversent plusieurs biomes climatiques mais possèdent une dynamique écologique propre. Les biomes de montagne sont parfois considérés comme des biomes azonaux. Leur répartition ne dépend pas uniquement du climat global d'une région, mais plutôt des facteurs liés à la topographie et à l'altitude.

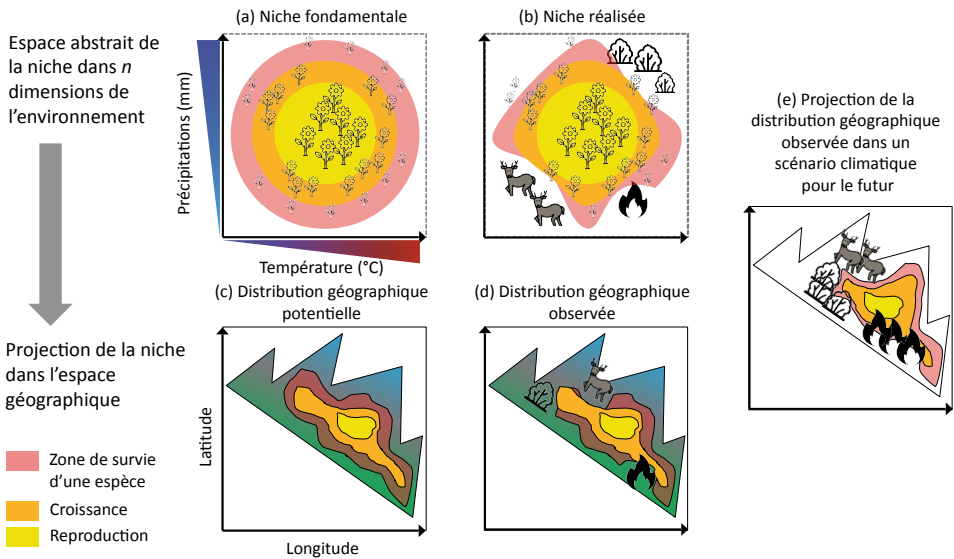
5.1 Le concept de la niche écologique des espèces

Le concept de la niche écologique est un outil puissant pour comprendre les relations entre le climat, le développement des espèces et leur distribution géographique. Il permet aussi de comprendre comment des facteurs de l'environnement, en particulier le climat, influencent directement et indirectement les chaînes alimentaires (les réseaux trophiques) des écosystèmes. La niche écologique est également un outil pour prédire les impacts du changement climatique sur les organismes et dans les écosystèmes.

Niche environnementale et niche trophique

Encadré 5.1 Qu'est-ce que la niche écologique ?

Comme les grands écosystèmes, les espèces peuvent aussi être décrites par des facteurs environnementaux et en particulier le climat. L'habitat et la distribution géographique des espèces peuvent être associés au concept de niche écologique et définis comme étant l'ensemble des sites où les individus d'une espèce peuvent vivre et se reproduire. Dans cet ouvrage nous utilisons le concept de la **niche réalisée des espèces**, qui est la résultante de la niche fondamentale (figure 5.2a) une fois les interactions biotiques et les perturbations intégrées (figure 5.2b). La niche fondamentale correspond aux conditions de l'environnement dans lesquelles une espèce peut maintenir sa survie, sa croissance et sa reproduction. La distribution géographique des espèces est associée généralement à la niche réalisée (figure 5.2d). La distribution géographique observée est un sous-ensemble de la distribution potentielle, que l'espèce n'occupe généralement pas entièrement, du fait, par exemple pour une espèce végétale, de la concurrence avec d'autres espèces de plus grande taille, de la présence d'herbivores, des perturbations comme les incendies (figure 5.2d) ou des limitations comme la distance de dispersion qui limite la colonisation par des propagules comme les graines des végétaux dans le contexte de changement climatique et de changement de distribution des espèces (figure 5.2e).



NOTE : La niche réalisée (d) est restreinte par des interactions biotiques, des perturbations comme le feu ou la capacité de dispersion de l'organisme décrit dans l'espace de sa niche écologique. Il est possible d'utiliser la niche réalisée pour des projections dans des scénarios de changements climatiques (e).

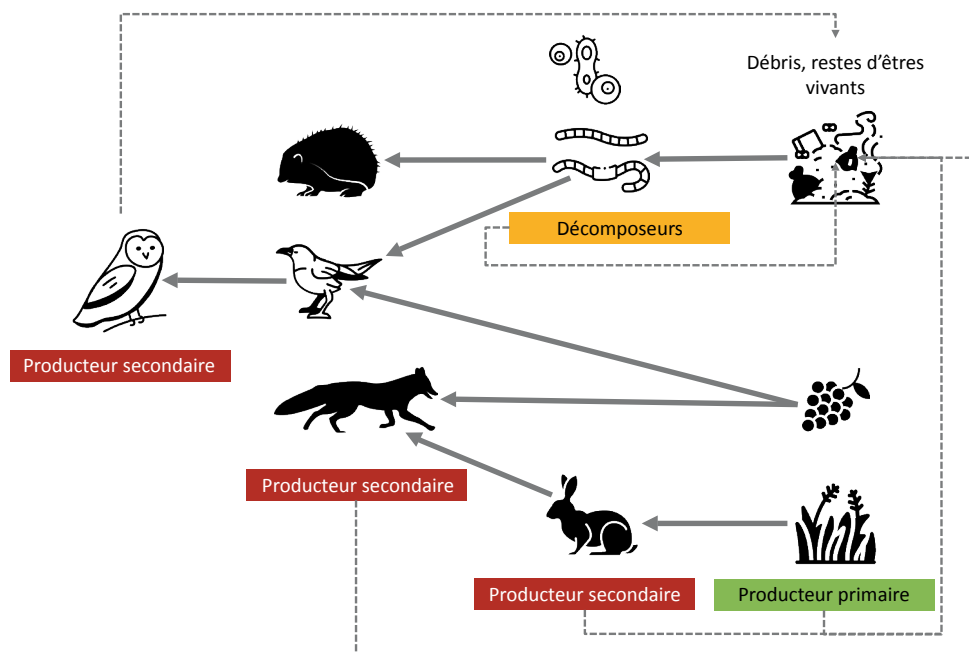
Fig. 5.2 Niche fondamentale (a) et niche réalisée (b) dans deux dimensions climatiques de l'environnement (températures et précipitations) et projections des deux niches dans l'espace géographique (c, d)³.

La niche peut aussi être décrite par les fonctions remplies par une espèce au sein de sa communauté ou de sa position dans un système trophique⁴. Un **système trophique** désigne l'ensemble des interactions alimentaires entre les organismes vivants au sein d'un écosystème (figure 5.3). Il est structuré en **niveaux trophiques**, allant des producteurs primaires (plantes, algues) aux consommateurs (herbivores, carnivores) et aux décomposeurs (bactéries, champignons). Ces interactions forment des **chaînes alimentaires** et des **réseaux trophiques** plus complexes, qui assurent le transfert d'énergie et de nutriments dans l'écosystème.

Le changement climatique perturbe les systèmes trophiques de plusieurs façons. Le réchauffement entraîne la migration ou la disparition de certaines espèces, modifiant ainsi la structure d'une chaîne trophique. Des espèces non indigènes invasives (souvent introduites) favorisées par le changement climatique peuvent également modifier une chaîne trophique.

Des variations du climat et de disponibilité des ressources peuvent affecter la croissance des producteurs primaires, modifiant les ressources disponibles pour l'ensemble du réseau trophique. La phénologie de certaines espèces du réseau (la date d'apparition des phases récurrentes ou saisonnières du développement d'une espèce comme le développement des feuilles au printemps) peut aussi changer, ce qui peut provoquer un décalage trophique (par exemple les prédateurs n'ont plus

accès à leurs proies habituelles au bon moment ; voir aussi « Exemple : Impacts du changement climatique en cascade dans un système trophique arctique » ci-après et figure 5.4). Des épisodes climatiques extrêmes (sécheresses) ou des perturbations causées par le changement climatique (incendies) peuvent détruire momentanément des habitats (un point d'eau dans la savane) ou des populations d'espèces, perturbant la disponibilité de ressources pour les autres organismes de la chaîne.



Exemple : Impacts du changement climatique en cascade dans un système trophique arctique.

Fig. 5.3 Un exemple de système trophique⁵.

Des recherches à long terme ont mis en évidence les effets du réchauffement climatique sur l'écosystème arctique et ses chaînes trophiques, en particulier sur le renard polaire, les populations de lemmings et les communautés nomades de Samis du Finnmark, en Norvège (figure 5.4). Le nomadisme des Samis et le renard arctique étant des symboles du Grand Nord, ce socio-écosystème et son évolution dans le contexte du changement climatique ont été particulièrement bien étudiés.

Le réchauffement climatique entraîne des hivers plus doux et des régimes de neige modifiés, affectant les cycles de population des lemmings et leurs pics démographiques. Les lemmings sont des proies essentielles pour les renards polaires. La diminution de leurs cycles et de leurs pics démographiques a été observée dans certaines régions arctiques, ce qui a des répercussions sur les prédateurs spécialisés comme le renard arctique qui dépend des effectifs de lemmings soudainement élevés pour se reproduire. Parallèlement, le renard roux, une espèce plus généraliste

que le renard arctique, étend son aire de répartition vers le nord en raison de conditions climatiques plus clémentes et au détriment du renard polaire, de plus petite taille. Cette expansion crée une compétition accrue pour le renard polaire, qui est moins adapté aux nouvelles conditions environnementales. Les Samis du Finnmark dépendent traditionnellement de l'élevage de rennes, une activité étroitement liée à l'écosystème arctique. Les changements climatiques affectent la végétation et la dynamique des populations animales, influençant ainsi la disponibilité des ressources pour les rennes. Par exemple, la modification de la couverture neigeuse et l'augmentation de la fréquence des épisodes de gel-dégel rendent l'accès à la nourriture plus difficile pour les rennes et augmentent leur mortalité hivernale, favorisant à nouveau le renard roux qui est aussi charognard.

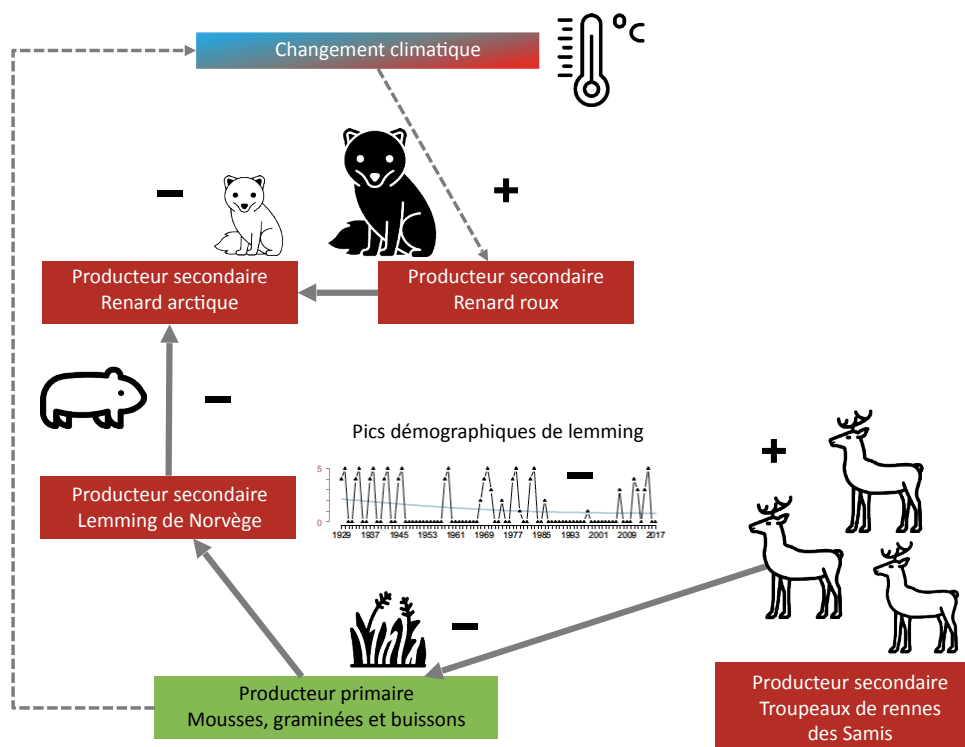
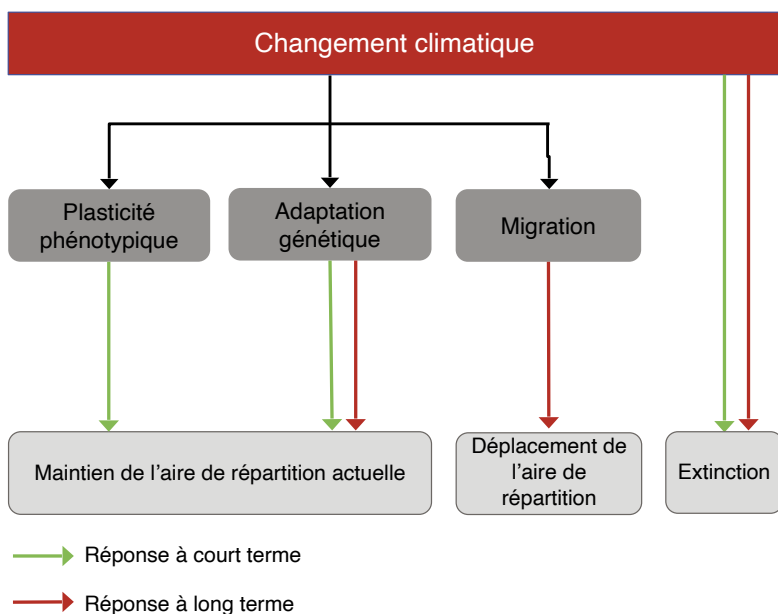


Fig. 5.4 Schéma d'un réseau trophique simplifié de l'extrême Arctique et représentant les composantes du réseau alimentaire impliquées dans les cycles de population du lemming de Norvège⁶.

5.2 Réactions des organismes face au changement climatique

Trois mécanismes peuvent déterminer la réponse des espèces aux changements environnementaux de manière générale, et en particulier au changement climatique : la **plasticité phénotypique**, la **migration** et l'**adaptation génétique** (figure 5.5).



NOTE : La réponse par l'adaptation génétique peut être plus ou moins rapide selon le temps écoulé entre générations. Pour certaines espèces, ce potentiel évolutif (« évolvabilité ») face au climat peut être de quelques années seulement.

Fig. 5.5 Les trois principales réactions des organismes face au changement climatique⁷.

La plasticité phénotypique

La **plasticité phénotypique** est la capacité pour un organisme ou un individu d'une espèce d'exprimer différents **phénotypes** (caractéristiques observables d'un organisme résultant de l'interaction entre son patrimoine génétique et son environnement) selon les conditions environnementales. Cette plasticité permet à un individu de répondre dans une certaine mesure aux variations du climat à court terme. Le déploiement de plus en plus précoce des feuilles des arbres dans un climat tempéré avec l'arrivée de plus en plus rapide de températures élevées au printemps est un exemple de réponse plastique d'un individu d'une espèce. Cette réponse peut avoir des conséquences positives ou négatives sur sa croissance, sa reproduction et sa distribution, ou en cascade dans le réseau trophique.

La phénologie est la science qui étudie les événements périodiques du cycle de vie des organismes en relation avec les variations du climat et des saisons. Les rythmes saisonniers déterminent la capacité à acquérir des ressources. Ils définissent par exemple la période de croissance avec le démarrage de la photosynthèse et de la reproduction lorsque les conditions climatiques sont favorables. Ils apparaissent ainsi comme un facteur clé dans la stratégie de survie de ces espèces. Chez les espèces animales, les événements phénologiques interviennent dans le succès de reproduction et la survie, particulièrement chez les jeunes individus. Les rythmes

saisonniers, les phases phénologiques, peuvent être considérés comme la composante majeure contrôlant la niche des espèces et leur distribution (la projection de cette niche dans l'espace géographique ; figure 5.2d). La phénologie est une discipline scientifique ancienne qui remonte au XVIII^e siècle. Il existe de longues séries d'observations qui peuvent atteindre près de mille ans (il existe donc des observations depuis le début du deuxième millénaire), comme les dates de floraison du cerisier au Japon ou le ban des vendanges en France. Du fait du réchauffement climatique, la phénologie connaît un regain d'intérêt. Les événements phénologiques des plantes étant fortement corrélés aux températures, les décalages (ou déphasages) phénologiques s'imposent comme des marqueurs ou indicateurs directs du réchauffement climatique, à l'instar du recul des glaciers. Ces décalages sont aussi des exemples de mécanismes de réponse plastique des espèces face au changement climatique.

L'occurrence des événements phénologiques (les phéno-phases) a beaucoup évolué ces dernières décennies. Les phéno-phases du printemps sont plus précoces depuis les années 1970 en réponse au réchauffement climatique pour un grand nombre d'organismes⁸. En Europe tempérée, la saison de végétation (de l'émergence des feuilles au printemps jusqu'à leur perte en automne) chez les arbres à feuilles caduques a avancé en moyenne de 2,3 jours par décennie au cours des quarante dernières années. Sur la période 1980 à 2013 cette tendance pour l'émergence des feuilles correspond à un avancement de 3,4 jours par degré de réchauffement. L'occurrence des événements d'automne subit également des changements avec une tendance à être plus tardive (en moyenne d'un jour par décennie). Chez les arbres, comme d'autres organismes vivants à temps de génération long (> 1 an), ces changements sont essentiellement le résultat de la plasticité des traits phénologiques et non de changements évolutifs contrairement à des organismes vivants à temps de génération très court.

À l'échelle de l'individu, le décalage des phéno-phases ou plus généralement la réponse des organismes par leur plasticité phénologique peuvent affecter la croissance, la reproduction et *in fine* l'aire de répartition de l'espèce. À l'échelle des communautés, les décalages phénologiques peuvent avoir des effets sur les chaînes trophiques si un maillon de la chaîne présente un décalage phénologique par rapport au niveau trophique supérieur. Une asynchronisation phénologique croissante entre végétaux et animaux a été détectée au cours des quarante dernières années⁹. Cet asynchronisme des vitesses de décalage phénologiques entre les deux groupes d'organismes peut perturber les interactions trophiques, telles que les chaînes alimentaires, et finalement menacer la stabilité, la fonctionnalité et les services des écosystèmes à l'humain par des perturbations de la productivité, des cycles de nutriments, de l'eau et du carbone.

La migration

Au-delà d'une certaine gamme de variation de facteurs environnementaux comme le climat, la plasticité phénotypique peut se révéler insuffisante au maintien des

individus ou populations d'une espèce à un endroit donné. Sur le long terme, la survie des espèces va donc dépendre en partie de la capacité de migration de leurs individus ou propagules pour suivre le déplacement des conditions de leur niche environnementale.

La vitesse de migration des espèces est très difficile à estimer, particulièrement chez les végétaux. On peut distinguer des migrations de l'ordre de quelques mètres par année et des migrations longues de plusieurs kilomètres, souvent liées aux dispersions avec un vecteur animal (qui peut inclure l'humain) ou grâce à l'eau ou le vent. Les vitesses de dispersion à longue distance chez tous les organismes sont beaucoup moins étudiées car plus complexes alors qu'elles apparaissent comme un facteur essentiel pour prédire les capacités de migration futures des espèces et leurs réactions face au changement climatique.

En comparaison avec les dernières recolonisations postglaciaires où les paysages étaient relativement homogènes, la fragmentation du paysage et la modification des connectivités entre les écosystèmes liés aux activités humaines entravent la migration des espèces. Les phénomènes de compétition entre espèces affectent également le processus de migration (voir aussi figure 5.6). Enfin, l'amplitude et la vitesse des changements climatiques observées récemment et prévues pour le XXI^e siècle sont beaucoup plus élevées que celles rencontrées au cours du Quaternaire (+ 0,15 °C par siècle durant les transitions entre maximums glaciaires et périodes interglaciaires contre + 0,2-0,6 °C par décennie actuellement et selon les projections) et elles affecteront les capacités de migration des espèces et des végétaux en particulier. Ainsi, même en s'affranchissant de l'effet négatif de la fragmentation des paysages et en considérant que les espèces migrent aussi vite qu'au début de l'Holocène, de nombreuses études s'accordent pour prédire que la capacité de migration des végétaux sera insuffisante pour éviter tout événement d'extinction locale.

L'adaptation génétique

La diversité et le brassage génétiques lors des événements de reproduction peuvent également, à court et moyen termes, participer au maintien des organismes à l'échelle d'une population (et non pas au niveau de l'individu comme pour la plasticité phénotypique). Les allèles d'un gène sont des variantes d'un gène. Leur fréquence dans une population peut être influencée par des pressions de sélection liées aux conditions climatiques. La diversité de ces allèles confère alors un avantage adaptatif aux organismes qui les portent dans des environnements spécifiques, augmentant ainsi leur survie et leur reproduction. Certains allèles d'un gène sous sélection du climat peuvent être avantageux dans un climat plus chaud ou plus sec par exemple. La diversité génétique locale est donc une composante essentielle qui permet l'adaptation aux changements des conditions environnementales et donc du climat. Cependant, dans le contexte des changements globaux, notamment avec la fragmentation des paysages, la réduction de l'apport de diversité génétique par les flux de gènes pourrait restreindre l'adaptation génétique des populations aux changements climatiques. Les flux de gènes entre populations localement adaptées aux

changements du climat peuvent favoriser la diffusion d'allèles favorables aux nouvelles conditions climatiques ou à des conditions futures. Ainsi, les flux de gènes peuvent contenir des allèles pré-adaptés aux conditions environnementales futures et accélérer l'adaptation des populations dans les zones géographiques exposées au changement climatique. Ces gènes pré-adaptés pourraient permettre le maintien des populations mais aussi faciliter l'extension des aires de distribution.

Dans le contexte du changement climatique, il est difficile de prédire le poids des trois mécanismes de réponse aux changements environnementaux que sont la plasticité phénotypique, la migration et l'adaptation génétique. Des interactions complexes existent entre eux. Pour permettre la colonisation de nouveaux milieux, l'adaptation génétique et la dispersion doivent survenir en même temps. La migration dans un endroit donné peut favoriser la diffusion d'allèles s'avérant avantageux et permettre aux populations de répondre plus efficacement à la sélection. Enfin, les réponses plastiques et les traits de dispersion peuvent évoluer sous l'effet de la sélection.

Interactions entre changement climatique et autres facteurs directs des changements globaux

La réponse des organismes au changement climatique est compliquée par d'autres facteurs directs des changements globaux. Les changements d'utilisation du sol peuvent augmenter par exemple la fragmentation du paysage, ce qui est susceptible de ralentir ou empêcher la migration des espèces. L'introduction de nouvelles espèces qui deviennent envahissantes peut augmenter la compétition dans certains écosystèmes même si les espèces indigènes sont capables de s'adapter ou migrer (figure 5.6).

Pour persister sans avoir à migrer dans le contexte du changement climatique, les organismes doivent s'adapter à de nouveaux facteurs biotiques et abiotiques par la plasticité phénotypique ou l'adaptation génétique. Cependant, de nouvelles interactions biotiques, telles que la compétition, peuvent se produire avec d'autres organismes indigènes ou envahissants arrivant par migration (voir aussi figure 5.4). Dans une telle situation, les organismes indigènes capables de s'adapter par la plasticité phénotypique ou l'évolution par sélection naturelle doivent être de bons compétiteurs pour résister à l'extinction.

Si un organisme ne s'adapte pas au changement climatique, il doit soit migrer vers des climats plus propices et retrouver des conditions qui correspondent à sa niche écologique, soit disparaître. Pour des organismes qui ne peuvent pas migrer, comme les végétaux, l'adaptation peut se faire par la plasticité au niveau de l'individu. Au niveau des populations, l'adaptation génétique par la sélection naturelle est influencée directement par le climat ou indirectement par la compétition avec d'autres espèces (ou individus de la même espèce).

Une migration réussie ne peut avoir lieu que si la stratégie de dispersion de l'espèce le permet et si aucun obstacle (causé par exemple par la fragmentation du paysage) ne l'entrave.

Si une espèce survit à tous les mécanismes menant à l'extinction, une quasi-extinction est toujours possible. Par quasi-extinction, on entend ici qu'une espèce pourrait rester et persister dans quelques endroits dispersés sous la forme de populations reliques, mais très vulnérables à tout changement ultérieur comme des événements climatiques extrêmes, en particulier si les allèles présents ne confèrent pas un avantage adaptatif aux nouvelles conditions.

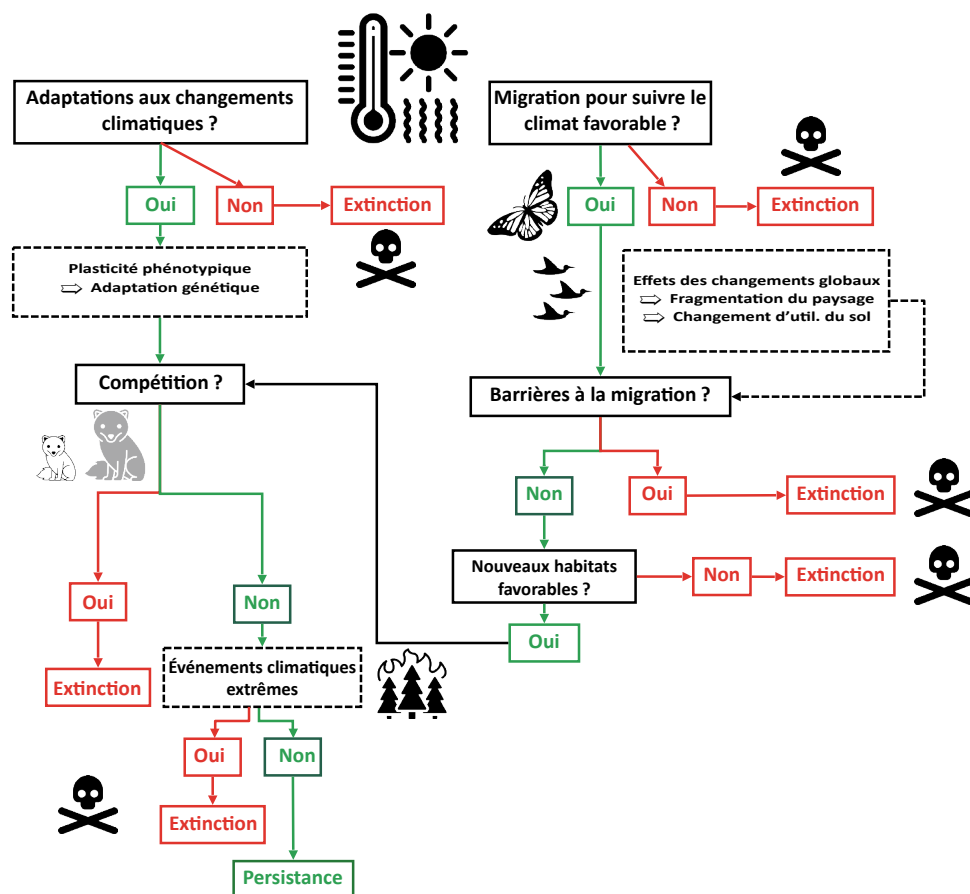


Fig. 5.6 Les trois principales réactions des organismes au changement climatique et leurs interactions dans le contexte des changements globaux¹⁰.

L'extinction est particulièrement attendue pour les espèces dont le temps de génération est long, dont le taux de croissance est lent et/ou dont la dispersion est faible. Le pin de Bristlecone (*Pinus longaeva*) illustre bien une espèce potentiellement exposée au changement climatique. Des individus de cette espèce peuvent vivre plus de 4000 ans, ce qui signifie qu'ils se reproduisent très lentement et mettent beaucoup de temps à s'adapter aux changements environnementaux. Leurs graines sont principalement dispersées par un oiseau, le casse-noix d'Amérique (*Nucifraga*

columbiana), qui les cache à proximité des arbres parents, limitant leur capacité de migration vers des climats plus favorables. La dispersion du pin de Bristlecone est locale et lente. Il pousse dans des régions montagneuses arides et froides de l'ouest des États-Unis (Californie, Nevada, Utah). Avec le réchauffement climatique, ces habitats deviennent plus chauds et encore plus secs, et il est difficile pour l'espèce de migrer vers des altitudes plus élevées. Les températures plus élevées favorisent également des ravageurs comme le scolyte du pin (insecte du genre *Dendroctonus*) qui attaque ces arbres.

La salamandre aux pieds rouges (*Plethodon shermani*), une espèce d'amphibien vivant dans les forêts humides des Appalaches, aux États-Unis, est un autre exemple animal d'espèce exposée au changement climatique. Son taux de reproduction est faible, ce qui limite sa capacité à s'adapter rapidement aux changements environnementaux et sa dispersion est limitée à quelques dizaines de mètres au cours de sa vie, ce qui rend très difficile la migration vers des zones plus fraîches à mesure que le climat se réchauffe, et son habitat est fragmenté par des routes et des zones déforestées. Une hausse de température accélère son métabolisme, ce qui augmente ses besoins énergétiques, alors que la disponibilité en matière de proies (insectes et invertébrés du sol) peut diminuer sous un climat plus chaud et sec.

6. Impacts du changement climatique sur les écosystèmes à l'échelle globale

Au cours du dernier cycle d'évaluation, entre 2016 et 2022, qui a abouti au sixième rapport d'évaluation du Giec, la base de connaissances sur les impacts et les risques observés et prédits (voir section 8.2) du changement climatique, ainsi que sur l'exposition et la vulnérabilité des écosystèmes et des sociétés humaines, s'est considérablement étoffée. Les impacts attribués au changement climatique et les principaux risques identifiés dans l'ensemble du rapport ont augmenté. Des risques complexes résultent d'aléas climatiques désormais plus souvent multiples et simultanés, et d'une interaction toujours plus marquée entre les facteurs directs et indirects des changements globaux.

Le changement climatique a déjà causé à l'échelle globale des atteintes de plus en plus irréversibles dans les écosystèmes terrestres, d'eau douce, côtiers et marins de haute mer (figure 6.1), avec une détérioration généralisée de la structure et de la fonction de ces écosystèmes, de leur résilience et de leur capacité d'adaptation naturelle. L'étendue et l'ampleur de ces impacts sont plus importantes que celles qu'ont estimées les évaluations précédentes du Giec.

Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes présentés dans cette section sont une synthèse du rapport du groupe de travail II du Giec de 2022¹.

L'augmentation observée de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes, au-delà de la variabilité naturelle du climat, notamment les extrêmes de chaleur sur terre et dans les océans, les fortes précipitations, les sécheresses et les incendies, a des répercussions étendues et généralisées sur les écosystèmes, les populations et les infrastructures. En effet, les impacts sur les écosystèmes et les sociétés humaines sont de plus en plus souvent liés à l'augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes météorologiques extrêmes. L'ampleur des événements climatiques extrêmes observés dépasse de plus en plus les valeurs projetées par les modèles climatiques, quel que soit le scénario d'émission. Ces impacts sur les écosystèmes sont notamment le blanchiment et la mortalité des coraux en eaux chaudes (figure 6.1a) et l'augmentation de la mortalité des arbres, due à la sécheresse (figure 6.1b). L'augmentation observée des zones touchées par des incendies de forêt est désormais attribuée au changement climatique dans certaines régions (figure 6.1c).

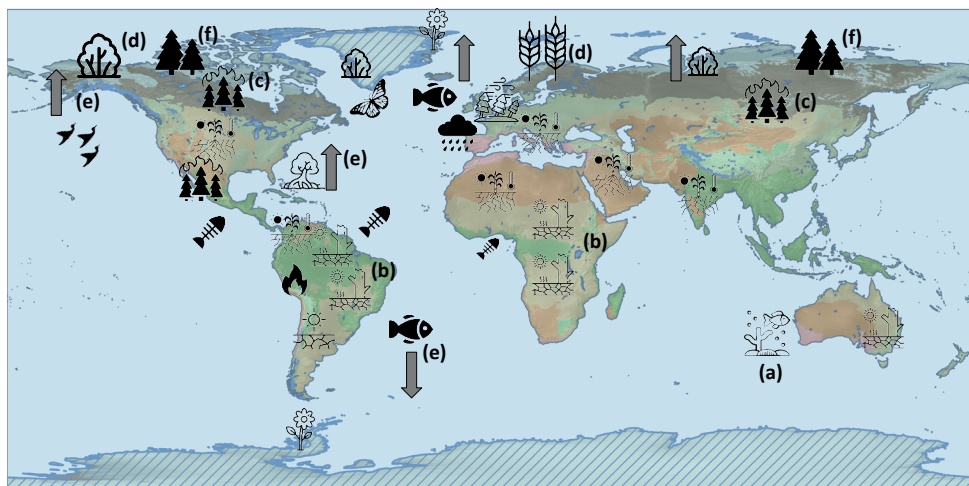


Fig. 6.1 Impacts du changement et des extrêmes climatiques sur les écosystèmes à l'échelle globale².

À l'échelle globale, on observe des signaux concordants et cohérents de la réponse des espèces au changement climatique. Il s'agit principalement des changements de phénologie (figure 6.1d) et des déplacements en latitude et en altitude aux limites supérieures latitudinales et altitudinales des organismes (figure 6.1e), autant dans les écosystèmes marins que terrestres. Les ordres de grandeur sont de 6 à 16 km par décennie vers les pôles (6 à 11 m par décennie en altitude), et une avancée moyenne des événements printaniers, de deux jours par décennie. La résultante des décalages phénologiques vers des phases printanières plus précoces et des migrations vers des altitudes et des latitudes plus élevées se matérialise par le verdissement de la toundra dans les hautes latitudes et de la végétation alpine des montagnes, au-dessus de la limite historique de la forêt. Les arbres et les buissons colonisent ces espaces jusqu'ici habités par des végétaux spécialisés de petite taille. En parallèle, la végétation en place se développe plus vite et la biomasse augmente. La colonisation des espèces forestières dans ce contexte est appelée « boréalisation » (figure 6.1f). Ce phénomène global, observé principalement dans l'arctique et dans les régions de montagne, visible par satellite, est appelé verdissement (*greening* en anglais). Colonisations de la forêt en latitude et altitude ou augmentation de la productivité des écosystèmes peuvent avoir des effets positifs sur la séquestration du carbone.

Environ la moitié des espèces évaluées dans le dernier rapport du Giec au niveau mondial se sont déplacées vers les pôles ou vers des altitudes plus élevées. Des centaines d'extinctions locales d'espèces ont été provoquées par l'augmentation et l'intensité des extrêmes thermiques. Les vitesses de migrations différentes entre les espèces peuvent causer des interférences dans les chaînes alimentaires, à l'instar des décalages phénologiques. Changements phénologiques et changements de distribution géographique ont des effets à long terme sur les écosystèmes et désormais des conséquences socio-économiques négatives.

Avec le changement climatique et ses impacts comme l'élévation du niveau des mers, la migration des espèces et la modification des habitats, la composition, la structure et les fonctions des écosystèmes sont modifiées. L'amplitude de variation de certains paramètres de ces « nouveaux écosystèmes » comme la démographie des espèces devient souvent plus instable, avec des risques de domination par certaines espèces ou par des espèces invasives.

Ces écosystèmes émergents peuvent cependant offrir des bénéfices inédits (par exemple augmentation du stockage du carbone ou purification de l'eau).

6.1 Impacts des phénomènes climatiques extrêmes sur les organismes et les écosystèmes

Des changements dans la fréquence, la durée et l'ampleur des phénomènes climatiques extrêmes (figure 6.2) peuvent avoir un impact sur le risque d'extinction des organismes ainsi que des atteintes sur les composantes biotiques et abiotiques des écosystèmes à des échelles locales ou régionales. De nombreux organismes se sont adaptés pour faire face à la variabilité du climat à court et à long terme (section 6.2), mais à mesure que l'ampleur et la fréquence des phénomènes extrêmes augmentent, superposées à la tendance climatique à long terme comme l'augmentation de température, le seuil entre les phénomènes climatiques extrêmes auxquels on peut survivre et les phénomènes extrêmes qui comportent un risque élevé d'extinction de populations ou d'espèces est franchi plus fréquemment (sur la figure 6.2 en rouge).

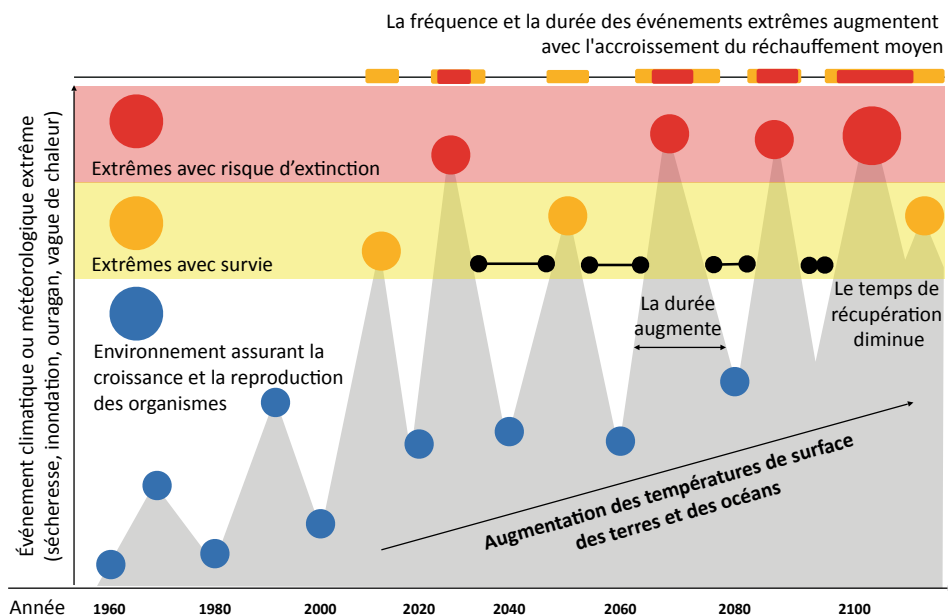


Fig. 6.2 Illustration conceptuelle de la manière dont le risque d'extinction est affecté par les changements dans la fréquence, la durée et l'ampleur des phénomènes météorologiques ou climatiques extrêmes (par exemple, sécheresses, incendies, inondations et vagues de chaleur)³.

Cela peut conduire à des extinctions locales avec un intervalle de temps insuffisant pour permettre le rétablissement des espèces concernées, ce qui entraîne des changements irréversibles à long terme dans la composition, la structure et la fonction des écosystèmes naturels. Lorsque l'événement extrême se produit sur une vaste zone par rapport à la répartition d'une espèce (par exemple, un ouragan frappant une île qui est le seul endroit où l'on trouve une espèce donnée), un seul événement extrême peut entraîner l'extinction mondiale d'une espèce. C'est pour cela que les petites îles sont particulièrement vulnérables.

Élévation du niveau des océans et épisodes extrêmes de montée des eaux

La somme des contributions de la fonte des glaciers et des calottes glaciaires est désormais la source dominante de l'élévation du niveau moyen des océans (GMSL en anglais) qui est une conséquence globale du changement climatique. La vitesse du GMSL est passée de 1,4 mm par an sur la période 1901-1990 à 2,1 mm par an sur la période 1970-2015, et à 3,6 mm par an sur la période 2006-2015.

L'élévation future du niveau moyen des océans causée par l'expansion thermique, la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et les changements dans le stockage de l'eau sur les continents dépend fortement du scénario RCP (voir encadré 3.1) qui sera suivi. Le niveau moyen des océans augmentera de 0,43 m (0,29 m-0,59 m, fourchette probable en suivant RCP2.6) à 0,84 m (0,61-1,10 m, fourchette probable en suivant RCP8.5) d'ici 2100 par rapport à la période 1986-2005. Au-delà de 2100, le niveau de la mer continuera à s'élever pendant des siècles en raison de la poursuite de l'absorption de chaleur par les océans et de la perte de masse des calottes du Groenland et de l'Antarctique, et restera élevé pendant plusieurs milliers d'années. En raison de l'élévation prévue du GMSL, des événements comme les cyclones et ouragans qui produisaient des montées des niveaux locaux des océans et des vagues de submersion une fois par siècle (événements centennaux historiques) devraient devenir au moins des événements annuels un peu partout au cours du XXI^e siècle.

Les écosystèmes côtiers sont déjà affectés par la combinaison de l'élévation du niveau moyen des océans, d'autres changements indirects liés au climat comme l'acidification des océans et d'autres composantes directes et indirectes des changements globaux comme les effets négatifs des activités humaines le long des côtes (conversions ou exploitation des écosystèmes naturels). L'attribution de ces impacts à l'élévation du niveau des océans reste toutefois difficile en raison de l'influence d'autres facteurs climatiques et non climatiques tels que le développement d'infrastructures et la dégradation de l'habitat induite par les activités humaines. Les écosystèmes côtiers, y compris les marais salants, les mangroves, les dunes végétalisées et les plages de sable, peuvent se développer verticalement en colonisant la côte et s'étendre en latitude en réponse à l'élévation du niveau des océans. Ces écosystèmes fournissent des services importants, notamment la protection des côtes et des habitats à de nombreuses espèces. Cependant, en raison des actions humaines qui fragmentent ces écosystèmes et limitent la migration des espèces vers l'intérieur des

terres ou en latitude, les écosystèmes côtiers perdent progressivement leur capacité à s'adapter aux changements induits par le changement climatique et à fournir des services écosystémiques, notamment en jouant le rôle de barrières protectrices. Il existe par exemple des rétroactions et des interactions entre érosion, salinisation et écosystèmes. Le changement de distribution d'un écosystème côtier peut influencer les vitesses d'érosion et la salinisation des terres, et vice versa.

Vagues de chaleur marines et aquatiques

Le changement climatique anthropique a considérablement augmenté la probabilité de vagues de chaleur marines. Une vague de chaleur marine généralisée s'est produite dans le nord-est du Pacifique entre 2013 et 2015, avec des anomalies des températures de la couche supérieure de l'océan jusqu'à 6,2 °C supérieures à la moyenne de 2002-2012. Cet événement, appelé « Blob », était une grande masse d'eau relativement chaude dans l'océan Pacifique, au large des côtes de l'Amérique du Nord, détectée pour la première fois à la fin de l'année 2013, qui a continué à se propager tout au long de 2014 et 2015. Ce Blob a renforcé la stratification des eaux de surface, diminuant l'apport en nutriments, la production primaire dans les chaînes alimentaires et entraînant des changements généralisés dans les écosystèmes côtiers et de haute mer, avec des déplacements géographiques d'espèces clés à tous les niveaux trophiques, des échouages massifs de mammifères marins, des mortalités d'oiseaux de mer et la fermeture de pêcheries.

Les vagues de chaleur marines peuvent également augmenter considérablement les émissions de méthane (CH₄) des océans, ce qui constitue une rétroaction positive importante sur le réchauffement climatique. Les vagues de chaleur, les tempêtes et les inondations peuvent aussi affecter le régime thermique et le fonctionnement biogéochimique des lacs et des rivières. Les vagues de chaleur extrême entraînant des températures de l'eau anormalement élevées peuvent réduire le brassage des lacs, ce qui provoque une diminution de l'oxygène et de son renouvellement en eaux profondes. Les ectothermes (animaux à sang froid dont la température corporelle dépend directement de celle de leur environnement) tels que les poissons et les invertébrés sont particulièrement sensibles à ce stress lié à la température et à l'oxygène. Leurs besoins métaboliques augmentent avec l'augmentation de la température et les habitats favorables diminuent à la fois en raison des températures élevées et des concentrations d'oxygène plus faibles dans les lacs et les rivières. Cette augmentation prévue des mortalités pourrait faciliter le déplacement des espèces de poissons d'eau chaude vers les espèces d'eau froide. Les inondations mobilisent les nutriments et les sédiments et favorisent la dispersion des espèces envahissantes dans les cours d'eau, tandis que les sécheresses extrêmes réduisent la connectivité des cours d'eau, menaçant ainsi leur biodiversité.

Vagues de chaleur terrestres

Des vagues de chaleur peuvent se produire régulièrement et dépasser les seuils physiologiques de certaines espèces, notamment les oiseaux et d'autres petits

endothermes (organismes qui produisent leur propre chaleur corporelle pour maintenir une température interne relativement constante, indépendamment de la température extérieure). Les vagues de chaleur, notamment en Australie, en Amérique du Nord et en Afrique australe, ont provoqué des événements de mortalité massive dus à l'hyperthermie et à la déshydratation, réduisant la reproduction des espèces et leur répartition géographique. Les vagues de chaleur terrestres peuvent désormais toucher l'Antarctique qui a connu sa première vague enregistrée en 2020. Des températures record ont été enregistrées dans l'Antarctique de l'Est, avec une température maximale (9,2 °C) dépassant de ~ 7 °C le maximum moyen, avec des températures minimales dépassant 0 °C. Des températures record (18,3 °C) ont également été enregistrées dans l'Antarctique occidental.

Il est trop tôt pour connaître l'impact sur la vie polaire, mais on s'attend à ce qu'un réchauffement aussi brutal ait des effets très divers sur les écosystèmes de l'Antarctique, allant de l'inondation soudaine à l'excès d'eau de fonte, fournissant de l'humidité aux écosystèmes polaires arides. Les vagues de chaleur en Sibérie en 2016, 2018 et 2020, avec des anomalies de température de l'air dépassant 6 °C, ont été associées à de vastes incendies de forêt, à des infestations de ravageurs et à la fonte du pergélisol.

Vulnérabilité des organismes aux extrêmes climatiques

Plusieurs caractéristiques augmentent la vulnérabilité des organismes aux extrêmes climatiques : une tolérance thermique faible ou étroite, une niche écologique et/ou une distribution géographique restreintes, une faible capacité de dispersion, des temps de génération longs, une faible capacité de résistance à la compétition et des contraintes liées au cycle de vie qui limitent la récupération ou la recolonisation. Les populations vivant aux limites de leur distribution géographique sont également vulnérables.

6.2 Impacts du changement climatique sur les grands écosystèmes

Aucun des grands écosystèmes terrestres ou aquatiques de la planète n'est désormais épargné par les impacts directs et indirects du changement climatique (figure 6.1). Si le changement climatique n'est pas actuellement le principal facteur de perte de biodiversité, il deviendra une menace importante si le réchauffement se poursuit. La perte de biodiversité nuit à la capacité de fonctionnement de nombreux écosystèmes et menace les services écosystémiques essentiels dont dépendent les sociétés humaines, notamment la fourniture de nourriture et d'eau potable et l'élimination d'environ 31 % des émissions de CO₂ anthropique⁴. Comme beaucoup d'autres systèmes complexes, les écosystèmes réagissent non linéairement au changement climatique, avec des points de bascule au-delà desquels des changements irréversibles vers un état écologique différent sont attendus, menaçant davantage

la biodiversité. De petites perturbations des écosystèmes par le climat peuvent ainsi entraîner des changements disproportionnés, avec des rétroactions qui peuvent à leur tour induire des changements du système climatique. Les preuves de l'existence des points de bascule pour certains écosystèmes sont déjà bien documentées et des rétroactions positives apparaissent dans les écosystèmes tropicaux et arctiques. De grandes parties de la forêt amazonienne peuvent basculer en forêts dégradées ou en savanes. Dans les savanes ouvertes et les zones arides, l'assèchement peut conduire à la désertification dans certaines régions, tandis que dans d'autres, le développement des arbres et des arbustes peut transformer ces écosystèmes riches en biodiversité dans un état forestier ou dégradé. La pollution par les nutriments et le réchauffement peut faire basculer les lacs dans un état de faible teneur en oxygène dominé par les algues. Les récifs coralliens connaissent déjà des points de bascule, car les épisodes de blanchiment plus fréquents, la pollution, les phénomènes climatiques extrêmes et les maladies les font basculer dans un état dégradé⁵. Dans la section suivante, nous présentons les grands biomes et écosystèmes les plus menacés par le franchissement de points de bascule.

Écosystèmes tropicaux

Quarante-cinq pour cent des forêts du monde se situent dans les régions tropicales (régions sans gel). Celles-ci sont des régulateurs du climat au niveau mondial. Elles sont également un important réservoir de biomasse et de biodiversité terrestres. Les forêts tropicales contribuent aussi à l'adaptation au changement climatique et à l'atténuation de ses effets. Cependant, 90 % de la déforestation se produit dans les forêts tropicales. La déforestation tropicale est en grande partie due à l'agriculture, qu'il s'agisse de l'agriculture de subsistance ou de l'agriculture intensive et industrialisée (par exemple bétail ou plantations de palmiers à huile ou pour la production de bois et de soja). La déforestation réduit généralement les précipitations et augmente les températures et le ruissellement de surface. L'assèchement et la fragmentation du paysage induits par la déforestation aggravent le risque d'incendie et réduisent la résilience des forêts, conduisant à la dégradation ou à la savanisation des biomes forestiers tropicaux, en particulier en combinaison avec le changement climatique.

Les modèles climatiques globaux indiquent également qu'un réchauffement global sévère entraînerait une contraction de la zone favorable des forêts tropicales en Amazonie, bien qu'elle puisse être au moins partiellement compensée par une expansion en Afrique. Les forêts tropicales stockent entre 200 et 300 GtC. Si une partie de ce carbone entrait dans l'atmosphère (jusqu'à 75 Gt), les concentrations de CO₂ augmenteraient de plus de 100 ppm, ce qui exacerberait le réchauffement climatique et réduirait le puits de carbone tropical.

Récifs coralliens

Les récifs coralliens tropicaux et subtropicaux sont menacés par les pressions anthropiques, notamment la surpêche, les dommages directs, la sédimentation,

l'acidification des océans et le réchauffement climatique. Lorsque la température de l'eau dépasse un certain seuil, les coraux expulsent de manière irréversible leurs algues symbiotiques, ce qui entraîne un blanchiment des coraux et donc leur mort. L'acidification des océans aggrave la dégradation induite par le réchauffement. L'effondrement des coraux ferait disparaître l'un des écosystèmes les plus riches en biodiversité de la planète, ce qui aurait des répercussions sur l'ensemble du réseau alimentaire marin, sur le cycle des nutriments et du carbone dans les océans et sur les moyens de subsistance de millions de personnes dans le monde. Bien que le blanchiment des coraux soit un processus localisé, un blanchiment synchrone peut se produire à l'échelle de ~ 1000 km (comme on l'a vu pour la Grande Barrière de corail), et on s'attend à ce que la poursuite du réchauffement entraîne un blanchiment généralisé. L'adaptation peut être possible avec des taux de réchauffement plus lents, mais le Giec a prévu une perte de 70 à 90 % des récifs coralliens tropicaux et subtropicaux à 1,5 °C et une perte quasi totale à 2 °C.

Forêts boréales

Vingt-sept pour cent des forêts mondiales sont des forêts boréales. Si les forêts tropicales humides sont souvent appelées les « poumons de la Terre » en raison de leur rôle dans le système climatique, on a jusqu'à présent accordé beaucoup moins d'attention aux forêts boréales et tempérées qui s'étendent au nord de l'Asie, de l'Amérique du Nord et de l'Europe. Pourtant, les forêts septentrionales jouent un rôle tout aussi essentiel dans notre système climatique et dans l'atténuation des effets du changement climatique : elles stockent environ 54 % du carbone terrestre de la planète et contribuent pour plus d'un tiers au puits de carbone terrestre mondial. Le biome boréal est à lui seul le deuxième plus grand biome terrestre du monde.

L'exploitation intensive du bois est actuellement la plus grande menace qui pèse sur les forêts nordiques. Les forêts dont la résilience a été réduite par des décennies d'exploitation forestière sont maintenant confrontées à d'autres dommages aggravés par l'impact direct du changement climatique ou ses conséquences indirectes comme les incendies. Ces impacts croisés menacent de transformer certains écosystèmes de puits de carbone en sources. En revanche, les forêts boréales primaires (sans exploitation par les humains) sont moins touchées par les effets du changement climatique.

Dans les forêts boréales, la sécheresse a déjà entraîné une augmentation de la mortalité des arbres au cours des deux dernières décennies. La fréquence et l'étendue des incendies de forêt ont été plus élevées ces dernières années qu'à n'importe quel moment au cours des 10 000 dernières années. Les incendies plus fréquents et plus graves contribuent à l'échec de la récupération des forêts après un incendie, à l'augmentation des émissions de carbone, à la diminution du potentiel de puits de carbone et à la re-séquestration incomplète du carbone au cours des saisons de croissance suivantes. Les incendies de forêt boréale libèrent 10 à 20 fois plus d'émissions de carbone par unité de surface brûlée que, par exemple, les biomes ou écosystèmes de prairie.

La gravité, l'étendue et la durée des épidémies d'insectes se sont accrues au cours des dernières décennies. Les températures plus élevées, les saisons de croissance plus longues, les défenses des arbres affaiblies à la suite de sécheresses ou d'incendies de forêt favorisent le développement des insectes et réduisent la mortalité des ravageurs. Les forêts très homogènes sont plus exposées aux invasions d'insectes et aux dégâts, ce qui rend les plantations ou les forêts gérées plus vulnérables que les forêts anciennes.

Avec l'augmentation des températures, les forêts nordiques s'étendent vers le nord sur de nouveaux territoires et connaissent des phénomènes de dépérissement le long de leurs limites méridionales. Toutefois, les effets négatifs du réchauffement dépassent le potentiel de séquestration du carbone de l'expansion des forêts boréales vers le nord. L'expansion vers le nord des forêts diminue l'albédo de ces nouvelles surfaces, ce qui contribue au réchauffement de ces régions car la forêt boréale absorbe plus de chaleur que la toundra.

Écosystèmes polaires

L'Arctique maritime subit les effets du changement climatique à des niveaux et à des rythmes qui sont parmi les plus élevés au monde et subiront des modifications profondes déjà à l'horizon 2050 dans tous les scénarios de réchauffement. Ces multiples éléments physiques et écologiques s'approchent de certains points de bascule et de changements potentiellement irréversibles pendant des centaines d'années, voire des millénaires. Des preuves de la boréalisation (figure 6.1e, f) des systèmes terrestres et marins apparaissent, et des impacts en cascade sont en cours.

L'évolution de la banquise principalement pluriannuelle vers une banquise saisonnière modifie profondément la dynamique du phytoplancton arctique, ce qui perturbe toute la chaîne alimentaire, des micro-organismes aux grands prédateurs comme les ours polaires et les humains qui dépendent des ressources marines. En effet, les organismes associés à la glace de mer sont souvent des composants essentiels des chaînes alimentaires polaires et on s'attend à des effets en cascade jusqu'aux prédateurs supérieurs. La réduction de la couverture de glace en été expose plus d'eau libre à la lumière du soleil dans l'océan Arctique, ce qui favorise la croissance du phytoplancton. Le phytoplancton est l'ensemble des micro-organismes végétaux vivant en suspension dans les milieux aquatiques comme les océans, les lacs et les rivières. Les diatomées font partie de ces micro-organismes. Ce sont des microalgues particulièrement abondantes dans les régions polaires. Le phytoplancton est à la base de la chaîne alimentaire dans l'océan Arctique et constitue la nourriture principale du zooplancton (comme les copépodes et le krill), qui est lui-même consommé par des organismes plus grands comme les poissons, les oiseaux marins et les mammifères marins. Les changements dans la phénologie des efflorescences favorisent cependant le petit phytoplancton et le petit zooplancton au détriment du grand macro-zooplancton plus riche en lipides. Les espèces de poissons et d'invertébrés pêchées voient leur aire de répartition se réduire et leur productivité diminuer, notamment le cabillaud du Pacifique, le saumon, le crabe royal dans l'Arctique

et le krill dans l'Antarctique, ce qui a des répercussions sur les systèmes alimentaires à l'échelle mondiale et régionale.

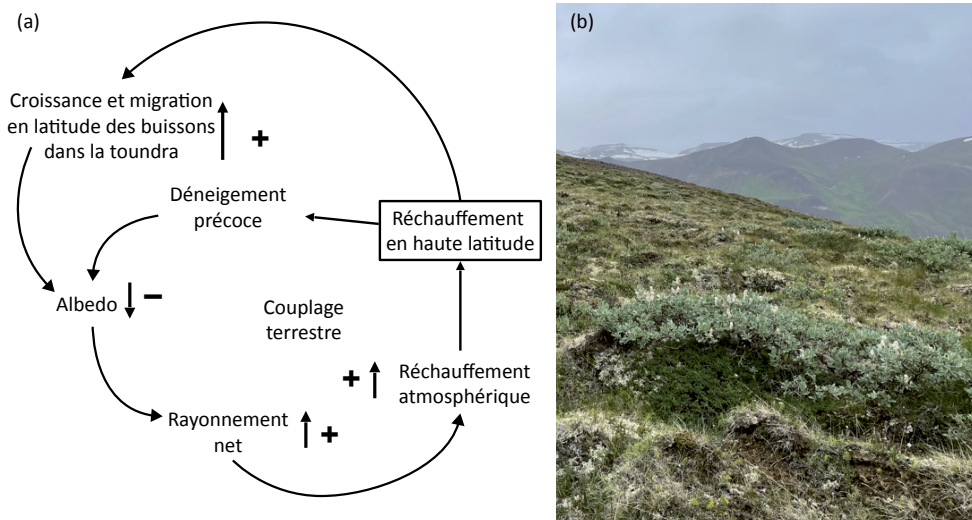
L'apparition d'un océan Arctique saisonnièrement libre de glace d'ici le milieu du siècle entraînera une contraction encore plus importante de l'aire de répartition, voire la disparition de nombreuses espèces de poissons, d'oiseaux et de mammifères marins de l'Arctique, y compris l'extinction possible des phoques et des ours polaires dans certaines régions.

Invasions des buissons dans la toundra de l'Arctique :
un exemple de boucle de rétroaction

On peut s'attendre au franchissement de plus en plus de points de bascule dans les grands écosystèmes de la planète et à l'apparition de boucles de rétroaction de ces écosystèmes vers le système climatique. L'expansion des buissons dans l'Arctique illustre ce mécanisme de rétroaction positive. Des analyses de photographies aériennes historiques et modernes de paysages arctiques en Alaska montrent une augmentation significative de l'abondance des arbustes au cours des cinquante dernières années, en particulier des aulnes, des saules et des bouleaux nains. Cette expansion modifie la répartition de l'énergie en été, influence la capture et la distribution de la neige en hiver, et augmente le stockage de carbone dans une région considérée comme une source nette de dioxyde de carbone. Les études de terrain et la télédétection corroborent ces observations, suggérant qu'une transition végétale panarctique est en cours. Cette transition pourrait altérer la structure et le fonctionnement des écosystèmes arctiques, avec des implications significatives pour le climat, la biodiversité et les populations humaines. En effet, l'expansion des arbustes dans l'Arctique est considérée comme une boucle de rétroaction positive sur le climat (figure 6.3). L'augmentation de la couverture arbustive modifie l'albédo de la surface terrestre, entraînant une absorption accrue de la chaleur solaire et contribuant ainsi au réchauffement climatique. De plus, une couverture neigeuse plus épaisse autour des arbustes isole le sol, entraînant un dégel plus profond du pergélisol et la libération de GES supplémentaires. Ces processus amplifient le réchauffement climatique en cours.

Les organismes et écosystèmes polaires sont susceptibles d'être particulièrement vulnérables aux événements climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur en raison de leurs niches thermiques spécifiques et de leurs seuils physiologiques, ainsi que de l'absence de « refuges » au pôle. Dans la plupart des régions de toundra, les interactions entre le climat et l'évolution de la végétation influenceront l'intensité et la fréquence futures des incendies. Même si le cycle global de l'eau dans la région s'intensifie, avec notamment une augmentation des précipitations, de l'évapotranspiration et du débit des cours d'eau vers l'océan Arctique, le recul de la neige et du pergélisol pourrait entraîner un assèchement des sols. Dans ce contexte, le dégel du pergélisol et la diminution des chutes de neige entraînent déjà de profonds changements hydrologiques qui provoquent un verdissement général de la toundra, mais aussi un brunissement régional de la toundra et des forêts boréales, causé par

les incendies et les épisodes de sécheresse. Les invasions d'espèces devraient augmenter avec la hausse des températures, ce qui représente un risque pour les espèces polaires endémiques. Le long de la péninsule antarctique, les températures du sol sont désormais suffisantes pour permettre la germination de plantes non indigènes (figure 6.1).



NOTE : Ces changements de croissance et de distribution engendrent une boucle de rétroaction positive avec un réchauffement de l'atmosphère (schéma). Saule laineux (*Salix lanata*) dans la toundra (Islande, Akureyri).

Fig. 6.3 Impacts de la croissance et de la migration en latitude des buissons dans l'Arctique⁶.

6.3 Impacts du changement climatique en Suisse

Par sa position géographique en Europe, sa topographie et ses activités économiques, la Suisse est particulièrement exposée aux impacts du changement climatique. À l'instar des grands écosystèmes à l'échelle globale, on constate déjà des impacts en cascade, des glaciers des Alpes jusqu'aux grands centres urbains, avec des conséquences sur les cycles hydrologiques, la croissance et la distribution des organismes, induisant des transformations visibles du paysage et des mutations socio-économiques, conséquences d'un besoin d'adaptation rapide.

Le pays est particulièrement exposé au changement climatique, avec des impacts déjà mesurables sur les écosystèmes et des impacts sociaux et économiques croissants. Les températures y ont fortement augmenté depuis le début de leur mesure systématique à la fin du XIX^e siècle et la moyenne actuelle se situe déjà 2,9 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle 1871-1900 (état en 2025).

Le fort réchauffement a des répercussions sur de nombreux autres paramètres climatiques en Suisse. L'isotherme du zéro degré s'est déplacé 300 à 400 m plus en haut en altitude. Le nombre de jours de gel a diminué de 60 % depuis 1961. Comme à l'échelle mondiale, les extrêmes climatiques ont également augmenté en Suisse avec des épisodes de pluies 12 % plus intenses et 26 % plus fréquents, et des précipitations hivernales en augmentation de 20 à 30 % depuis 1864. Malgré cette augmentation, le nombre de jours de neige a diminué de 50 % au-dessous de 800 m et de 20 % vers 2000 m depuis 1970. Les vagues de chaleur sont plus fréquentes et plus intenses depuis 1901. Les étés sont devenus plus secs depuis 1981, principalement à cause d'une diminution des précipitations estivales et de l'évaporation qui augmente avec le réchauffement⁷.

Ces modifications des paramètres du climat ont actuellement des conséquences particulièrement visibles sur la cryosphère, avec le recul des glaciers, et sur la biosphère, avec des changements de la phénologie et de la distribution des espèces. Les glaciers suisses ont perdu environ 65 % de leur volume depuis 1850 et couvrent actuellement 2 % du territoire contre un peu plus de 4 % à la fin du petit âge glaciaire⁸. En plaine, la période de croissance de la végétation dure aujourd'hui deux à quatre semaines de plus que dans les années 1960 et les distributions géographiques des grands groupes de végétaux et animaux se déplacent actuellement et en moyenne à des vitesses variant de plusieurs dizaines à une centaine de mètres par décennies.

Impacts sur les cycles hydrologiques

Les effets du réchauffement sur le cycle hydrologique en Suisse sont particuliers du fait de sa topographie et des montagnes qui couvrent 60 % du territoire. Les glaciers suisses reculent à un rythme sans précédent, perdant environ 2 à 3 % de leur volume par an ces dernières décennies et leur fonte s'accélère. Le pergélisol (ou permafrost) en Suisse couvre environ 5 % du territoire. Il se trouve principalement dans les Alpes, à des altitudes supérieures à 2500 m, mais il est menacé au-dessous de 3000 m. Depuis les années 1980, la température du pergélisol suisse a augmenté de 0,5 à 1 °C par décennie. En hiver (décembre à février), environ 40 à 50 % du territoire suisse est couvert de neige. À 1500 m d'altitude, la durée d'enneigement a diminué de 20 à 30 jours et l'enneigement, de 30 à 50 % depuis 1970.

La fonte des glaciers s'accompagne en outre d'un changement écologique rapide et durable. En effet, le retrait des glaciers libère de grandes surfaces sur lesquelles de nouveaux écosystèmes apparaissent. Ces marges proglaciaires offrent un refuge aux espèces végétales et animales aimant le froid mais la persistance de ces organismes dépend de la présence des glaciers en amont et de la disponibilité en eau, de la vitesse du réchauffement qui accélère l'évolution de ces écosystèmes de l'échelle du siècle à l'échelle de quelques dizaines d'années et de la compétition avec d'autres espèces moins spécialisées et de plus basse altitude. Cependant, les sédiments laissés derrière les glaciers constituent un danger lorsqu'ils ne sont pas encore stabilisés

par la végétation. En effet, ces surfaces fournissent de la matière pour les laves torrentielles.

Les glaciers laissent aussi apparaître de **nouveaux lacs proglaciaires**. Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (1850), environ 1200 nouveaux lacs proglaciaires sont apparus en Suisse. Rien qu'entre 2006 et 2016, 180 nouveaux lacs ont été recensés et le nombre total de lacs en haute montagne a augmenté d'environ 15 % au cours des quarante dernières années. Ils constituent de nouveaux écosystèmes, des refuges en altitude pour certaines espèces, des réserves d'eau, et ont potentiellement un attrait touristique.

Les glaciers jouent un rôle essentiel dans l'alimentation en eau des rivières, des lacs, et pour la recharge des nappes phréatiques, notamment en été. Leur disparition entraîne, avec les effets directs d'autres facteurs climatiques, la diminution des débits estivaux des rivières alimentées par la fonte des glaciers comme le Rhône, le Rhin ou l'Inn. Actuellement, on observe une hausse temporaire des débits des cours d'eau qui ont un régime glaciaire en raison de la fonte accélérée. Ce pic sera suivi d'un déclin progressif lorsque les glaciers seront trop petits pour compenser les périodes de sécheresse.

Les glaciers influencent aussi la température de l'eau et les écosystèmes aquatiques en aval. Les rivières glaciaires, riches en sédiments, abritaient des organismes adaptés (invertébrés, poissons d'eau froide). Avec des températures d'eau plus élevées, de nouvelles espèces colonisent ces milieux, perturbant la chaîne alimentaire.

Impacts sur les forêts

Les surfaces boisées représentent 32 % de la superficie totale de la Suisse et jouent un rôle clé pour la biodiversité, l'approvisionnement en eau et la protection contre les risques naturels. Quarante pour cent de l'ensemble des espèces et de l'eau potable du pays dépendent de la forêt et 49 %, de la surface forestière du pays a une fonction de protection contre les dangers naturels (90 % au Tessin et en Valais). Le hêtre est l'espèce d'arbre la plus répandue en basse altitude en Suisse mais a, au cours des derniers siècles, laissé sa place à l'épicéa, favorisé par les activités humaines pour sa croissance rapide jusqu'en basse altitude. L'épicéa est donc actuellement distribué et domine souvent dans l'ensemble des forêts suisses de 250 à 2200 m d'altitude.

L'augmentation des températures moyennes a un impact sur la distribution géographique et la phénologie des arbres en Suisse. Les limites supérieures des espèces dominantes dans les Alpes (sous la limite supérieure de la forêt) se sont déplacées en moyenne 70 m plus haut, valeurs très proches de celles relevées en France. Même si, jusqu'à présent, 90 % des déplacements de la limite supérieure de la forêt en altitude étaient expliqués par la déprise agricole et l'abandon des pâturages, des prairies et des zones d'estive en altitude, le climat influence désormais de plus en plus ces déplacements avec des vitesses de progression de 1 à 4 m par an.

En Suisse et en Europe, les décalages du développement des feuilles au printemps sont d'environ - 4 jours par décennie et de + 4 jours pour la sénescence et la

perte des feuilles en automne. On pourrait dès lors penser que cette réponse contribue notamment à atténuer le changement climatique, car une saison de croissance plus longue augmente la séquestration du carbone. Cependant, cette tendance à la précocité du développement au printemps pour les feuillus a ralenti d'environ 40 % au cours de la dernière décennie. L'une des hypothèses les plus susceptibles d'expliquer ce ralentissement est le réchauffement des hivers qui empêche les bourgeons d'entrer en dormance et de réagir positivement à la température au printemps. Ainsi, le changement climatique a un effet négatif sur la phénologie printanière des feuillus en basse altitude avec un ralentissement des décalages précoces et un effet positif en altitude où le froid persiste encore et permet de lever la dormance. Un autre effet négatif de l'allongement de la période de croissance causé par le décalage phénologique est l'exposition prolongée aux périodes de sécheresse durant l'activité photosynthétique des arbres.

Jusqu'à récemment, seules quelques forêts de pins sylvestres de basse altitude en Valais et dans les Grisons, et de châtaigniers au Tessin avaient montré des taux de mortalité plus élevés en raison de la sécheresse. Cependant, l'été sec et chaud de 2018 a provoqué une augmentation de la mortalité des hêtres et ceux-ci se sont moins bien rétablis qu'après l'été déjà record de 2003, similaire en termes d'intensité de la sécheresse. Les sécheresses des années précédentes (2015 et 2017) semblent également être un facteur décisif pour expliquer la mortalité de cette espèce. La mortalité à long terme des épicéas a elle aussi été multipliée par plus de cinq en raison d'une série d'années de sécheresse (2019, 2020 et 2022), ce qui représente plus du double de l'augmentation de mortalité consécutive à la sécheresse de 2003.

En Suisse, les insectes sont la deuxième cause des dégâts en forêt, après le vent. Le bostryche typographe (*Ips typographus*) est un insecte ravageur qui provoque de graves dégâts en s'attaquant presque exclusivement aux épicéas. Des températures élevées lui sont favorables et lui permettent de se multiplier, de se développer rapidement et d'infester une grande quantité d'arbres. En même temps, la chaleur et la sécheresse fragilisent les épicéas et leur résistance diminue ; ils sont alors plus sujets aux infestations. En Suisse, ces dernières ont été observées lorsque les températures ont été élevées en combinaison avec des périodes de sécheresse. On remarque également une recrudescence du bostryche après des tempêtes, comme celle de Lothar en 1999. L'infestation touche enfin la fonction protectrice des forêts, en particulier en Valais.

Les arbres croissent en principe plus vite quand il fait plus chaud – tant que les réserves d'eau dans le sol sont suffisantes durant la saison de croissance. La diminution de cette disponibilité en eau limite de plus en plus leur croissance à basse altitude en Suisse. Cela signifie une réduction probable à long terme des accroissements et des volumes de bois. À haute altitude au contraire, et comme pour les décalages de la phénologie, on peut escompter une plus forte croissance des arbres, car la disponibilité en eau devrait rester bonne la plupart du temps. Durant l'été en 2003, un tel contraste entre basse et haute altitude avait déjà été observé.

Le changement climatique va également modifier la composition et la structure des forêts protectrices. La fonction protectrice devra y être assurée par d'autres espèces d'arbres. Or, pour que ces nouvelles essences puissent s'établir, les forêts doivent se régénérer ou la migration doit être assistée par la gestion forestière. C'est pourquoi le processus de régénération constitue un élément clé de l'adaptation des forêts protectrices aux changements climatiques. Des simulations qui ont évalué l'impact de la sécheresse croissante sur l'efficacité des forêts protectrices contre les chutes de pierres ont montré une diminution progressive du hêtre et de l'épicéa au profit notamment du chêne pubescent et d'autres feuillus. Toujours selon ces simulations, le risque de chutes de pierres pourrait doubler dans un scénario modéré d'émission de GES et presque tripler dans un scénario extrême d'ici cent cinquante ans. Ces résultats soulignent l'importance de stratégies de gestion forestière adaptées telles que le rajeunissement des peuplements et la promotion de mélanges d'essences résistantes pour maintenir l'efficacité protectrice des forêts face aux défis climatiques.

La forêt en Suisse joue encore son rôle dans la séquestration du CO₂. Cependant, cette capacité est en diminution. En Allemagne, la forêt est devenue une source de CO₂ depuis 2017 et ne joue donc plus son rôle de puits.

Le changement climatique a aussi un impact sur les incendies de forêt. Chaque année en Suisse, on dénombre environ cent incendies de forêt, principalement dans les Alpes. À l'avenir, on table en été sur une augmentation du danger d'incendie de forêt dans toutes les parties du pays.

Impacts sur l'agriculture

L'élévation des températures, l'augmentation des phénomènes extrêmes (sécheresses estivales ou orages violents) modifient les conditions de production agricole en Suisse. Si certaines cultures bénéficient d'une saison de croissance plus longue, d'autres souffrent du stress hydrique, de la dégradation des sols et de l'augmentation des ravageurs et maladies. L'élevage est également affecté par le manque d'eau pour les troupeaux comme durant les étés 2015, 2018 et 2022 pour les alpages du Jura avec notamment l'intervention des forces aériennes pour l'acheminement de l'eau.

Dans le cas des céréales, l'augmentation de la température au cours des dernières décennies a conduit à des taux de croissance plus élevés et à une récolte toujours plus précoce.

Les vagues de chaleur et les pluies persistantes affectent les pommes de terre et entraînent de plus en plus de pertes de récolte. Alors que le tubercule cesse de croître à partir d'une température de l'air d'environ 30 °C, le mildiou se propage également en cas de pluies excessives, ce qui entraîne des pertes de récolte à grande échelle.

La température nocturne joue encore un rôle essentiel pour la formation de l'amidon. Elle devrait être de 15 à 18 °C et, au-dessus de 22 °C, le développement du tubercule est sérieusement entravé. Ainsi, l'augmentation du nombre des nuits tropicales pose des problèmes pour la culture de la pomme de terre en plaine.

Les prairies et pâturages occupent une place importante dans l'agriculture suisse et rendent de nombreux services en tant qu'écosystèmes semi-naturels : ressources génétiques des plantes fourragères, services liés à la pollinisation, protection contre l'érosion, stockage de carbone et services culturels. Les aspects esthétiques et paysagers de ces habitats revêtent aussi une grande importance pour le tourisme de montagne. L'augmentation de la température depuis 1950 a entraîné une floraison des graminées et une récolte du foin plus précoces dans les prairies en Suisse. L'avancée de la période de végétation ouvre de nouvelles opportunités dans la production de fourrage. Il est déjà possible de faire une coupe supplémentaire par saison de croissance pour autant que les prairies ne souffrent pas de sécheresse ou soient suffisamment irriguées. Cependant, les rendements des prairies sont fortement corrélés à la sécheresse estivale alors que les surfaces herbagères suisses couvrent une part importante des besoins en fourrage du pays. Dans l'ensemble du Valais, à l'exception du Chablais, l'irrigation est depuis longtemps un prérequis au maintien de l'agriculture de montagne. L'irrigation des prairies permet en partie aux agriculteurs de maintenir l'AOP raclette du Valais qui nécessite que le fourrage soit produit localement. Il a été montré que les fluctuations des rendements pour les surfaces herbagères s'expliquent à 50 ou 60 % par la sécheresse estivale. En outre, un manque d'eau persistant pendant les mois d'été peut entraîner des pertes de rendement de 30 à 40 % lors des années extrêmes, comme ce fut le cas pour 1998, 2003, 2006, 2015 et 2018.

Ces chiffres soulignent la vulnérabilité de la production fourragère et, plus largement, d'aliments pour les animaux face aux événements climatiques extrêmes. Les prairies et les pâturages situés sous 1000 à 1500 m d'altitude sont particulièrement touchés par la sécheresse estivale.

La série chronologique du cerisier de référence près de Liestal montre qu'aujourd'hui la floraison a lieu environ 14 jours plus tôt que la moyenne 1961-1990, ce qui correspond à la tendance générale vers une floraison plus précoce du cerisier et du pommier (5 ± 1 , ou 4 ± 1 jours par décennie). Les pertes causées par les journées de gel d'avril 2017 sur les arbres fruitiers ont soulevé la question de la probabilité de tels événements dans un climat plus chaud. Des études ont montré que, malgré l'augmentation de la température, le risque de gel dans la culture fruitière n'a pas diminué au cours des trente dernières années, mais a augmenté au-dessus de 800 m d'altitude. En effet, les dates de floraison se sont rapprochées plus rapidement du début de l'année que la date des dernières gelées.

Au cours du XXI^e siècle, l'augmentation de la température accélérera encore le rythme de développement des plantes et des animaux. Dans la culture fruitière, les stades phénologiques critiques tels que la floraison et la maturation se produiront encore plus tôt, selon le scénario, jusqu'à 30 jours avant la fin du siècle. Selon la région et le scénario, cela s'accompagnera d'une forte augmentation de la présence de générations supplémentaires de ravageurs.

La sécheresse pourrait devenir de plus en plus problématique pour l'agriculture à l'avenir. Les scénarios climatiques montrent une légère diminution des précipitations

cumulées à la fin du printemps et en été et, dans une plus large mesure, une augmentation de la durée des périodes de sécheresse. Une utilisation généralisée de l'irrigation pourrait, dans une certaine mesure, être considérée comme une option d'adaptation. Toutefois, les conflits d'utilisation possibles avec d'autres secteurs nécessitent des recherches plus approfondies sur les possibilités réelles. Le danger de **maladaptation** (voir section 7.2), qui pourrait résulter d'objectifs contradictoires entre la production alimentaire et la fourniture d'autres services écosystémiques, doit également être pris en compte.

Adaptation au changement climatique pour le futur en Suisse et solutions basées sur la nature

Si les écosystèmes à l'échelle globale et nationale sont menacés par les impacts du changement climatique et si ces écosystèmes menacent à leur tour le climat par des rétroactions positives, ils contribuent également à apporter des solutions (solutions fondées sur la nature, *nature-based solutions*, voir plus bas dans cette section). Les écosystèmes peuvent en effet contribuer à relever les défis que les changements globaux posent aux sociétés humaines, en particulier l'atténuation du changement climatique, et l'adaptation à ses impacts sur les risques naturels, la santé, l'approvisionnement en eau ou encore la sécurité alimentaire.

Certaines mesures d'adaptation au changement climatique pourront s'appuyer sur des solutions technologiques. Cependant, si elles sont planifiées suffisamment tôt, elles pourront également mobiliser des solutions basées sur la nature. Par exemple, il est possible de miser sur des espaces intérieurs d'habitation et de travail rafraîchis par des climatiseurs installés sur les bâtiments ou alors les constructions pourront être couvertes de toits végétalisés et être parsemées d'espaces verts et de plans d'eau ouverts afin d'atténuer les îlots de chaleur urbains.

La disponibilité de l'eau sera déterminante pour le développement de l'agriculture. Si elle est en quantité suffisante, l'agriculture profitera de l'allongement de la période de végétation. Il sera possible de pratiquer plusieurs cultures successives au cours d'une même période de végétation. Les céréales devront être récoltées plus souvent de manière précoce, éventuellement en urgence. Par conséquent, des cultures intermédiaires devront être cultivées afin de protéger le sol de l'érosion. Le choix des cultures agricoles sera également modifié en raison des sécheresses. Ainsi, les betteraves sucrières, les pommes de terre ou le maïs, qui ont besoin de beaucoup d'eau, ne pourront plus guère être cultivés vers la fin du XXI^e siècle. Ils pourraient être remplacés par des cultures plus résistantes à la sécheresse, comme la patate douce ou le sorgho.

L'agriculture joue un rôle important dans les Alpes suisses. Avec la montée en altitude des limites supérieures des végétaux, les conditions de l'économie alpestre vont changer. Une grande partie des prairies et pâturages actuels, et même des alpages, se situent en dessous de la limite actuelle de la forêt et de sa future limite. Sans fauche ni pâture, ces surfaces s'embroussailleront et, selon l'altitude, redeviendront des forêts. Parallèlement, les pelouses alpines gagneront de l'altitude et coloniseront

des surfaces aujourd'hui dépourvues de végétation. Dans ces conditions, la manière dont ces surfaces seront utilisées à l'avenir sera déterminante pour l'adaptation de l'agriculture. À cet égard, les scénarios suivants sont envisageables :

- si l'exploitation actuelle des alpages au-dessus de la limite actuelle de la forêt est réduite ou abandonnée, des forêts de buissons et des forêts s'installeront sur ces surfaces ;
- si les conditions climatiques sont mises à profit, les pâturages d'estivage pourront être aménagés à des altitudes plus élevées, au-dessus de la nouvelle limite des arbres. Cela nécessiterait un développement d'infrastructures à plus haute altitude, par exemple des routes d'alpage, des étables, des installations d'approvisionnement en eau ;
- si des systèmes sylvo-pastoraux sont mis en place sur les pâturages d'estivage actuels, un nouveau type de paysage pourrait voir le jour dans les régions de montagne. Une pâture régulière d'une intensité adaptée et une montée simultanée de la limite des arbres pourraient donner naissance à des pâturages parsemés d'arbres isolés.

La surface sur laquelle des systèmes sylvo-pastoraux peuvent se développer augmentera considérablement avec le changement climatique. Ce type d'exploitation favorise à la fois l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de celui-ci. Toutefois, l'extension à grande échelle de ce type de paysage dépendra des décisions prises par les exploitants.

La gestion de l'eau deviendra un défi central pour l'agriculture de montagne afin de garantir la disponibilité de cette dernière à long terme. En période de sécheresse, les besoins en irrigation des champs et des prairies de fauche augmentent et l'eau nécessaire à l'exploitation des alpages peut se faire rare. Différentes mesures d'adaptation sont envisageables pour faire face aux changements de conditions. D'une part, les réseaux de distribution d'eau pourraient être améliorés et l'infrastructure d'irrigation, développée pour maintenir les prairies. D'autre part, la production agricole pourrait être diversifiée par la culture de céréales plus résistantes à la sécheresse ou de produits de niche tels que les herbes aromatiques. Une période de végétation plus longue peut générer certains avantages pour l'agriculture régionale, comme une durée d'alpage plus longue.

Outre des périodes de sécheresse plus fréquentes, il faut s'attendre à des épisodes de fortes précipitations plus rapprochés et plus intenses dans toute la Suisse, ce qui entraînera des crues et des inondations plus fréquentes. Les hautes digues et les canaux bétonnés pour la protection des infrastructures sont très coûteux, nuisent parfois à la qualité du paysage, favorisent l'érosion du lit des cours d'eau et limitent les habitats naturels. Il est donc préférable d'élargir et de renaturer les cours d'eau, non seulement pour des raisons écologiques et paysagères, mais aussi pour des raisons techniques et économiques. De telles mesures sont toutefois relativement gourmandes en surface et entreront donc parfois en conflit avec d'autres utilisations du sol, comme la production agricole.

PARTIE 3

Impacts sociaux, justice et gouvernance climatique mondiale

Augustin Fragnière

7. Conséquences du changement climatique sur les sociétés humaines

Par l'intermédiaire des changements qu'il engendre dans les systèmes naturels, le changement climatique a de nombreux effets sur les sociétés humaines. Ces derniers sont causés en premier lieu par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des **événements extrêmes**, tels que vagues de chaleur, précipitations intenses, inondations, sécheresses, feux de forêt, ou encore cyclones intertropicaux. Ils sont aussi causés par des **processus lents et graduels**, comme l'élévation du niveau de la mer, la réduction des précipitations dans certaines régions ou l'acidification des océans¹ (voir section 3.3).

Lorsque l'on s'intéresse aux conséquences du changement climatique sur les sociétés humaines, il est utile de différencier les **impacts observés**, donc déjà présents dans certaines régions de la planète, des **risques**, c'est-à-dire les impacts potentiels, attendus dans le futur en fonction des caractéristiques climatiques, géographiques et socio-économiques d'une région donnée. Le terme « impact » fait généralement référence aux effets du changement climatique sur la vie, les moyens de subsistance, la santé et le bien-être, les biens sociaux et culturels, les biens et services économiques et les infrastructures. Le terme s'applique également aux écosystèmes, aux espèces, ainsi qu'aux services écosystémiques. Les impacts sont le plus souvent négatifs, mais ils peuvent également être bénéfiques dans certains cas². La section suivante s'intéresse aux impacts observés, alors que la suite du chapitre détaille la notion de risque climatique et donne quelques exemples de sa répartition inégale entre les diverses régions du monde.

7.1 Impacts observés

Les impacts observés du changement climatique sur les sociétés humaines sont variés et affectent les différents individus et populations de la planète de manière différenciée. Les catégories d'impacts présentées ici ne sont pas exhaustives mais sont souvent mentionnées dans la littérature scientifique. Il s'agit des impacts sur la **sécurité alimentaire**, sur la **santé** et le **bien-être**, sur les **migrations** et les **déplacements**, sur les **villes** et les **infrastructures**, ainsi que des **impacts économiques et culturels**. Ces différentes catégories d'impacts se recoupent, puisqu'elles ont souvent des causes communes et sont en interaction les unes avec les autres. Par exemple, les impacts négatifs du changement climatique sur la sécurité alimentaire et l'économie auront à leur tour des effets indirects sur la santé et sur les migrations. Il faut comprendre ces catégories comme différentes manières d'appréhender une même réalité, soit la

dégradation des conditions de vie par le changement climatique. Les impacts négatifs du changement climatique sont largement majoritaires, mais certaines régions peuvent également faire l'expérience de certains impacts positifs à court et moyen termes. Quelques exemples de ces derniers sont brièvement décrits à la fin de cette section. Les informations données dans les paragraphes suivants sont dans leur grande majorité tirées du rapport du groupe de travail II du Giec, de 2022³.

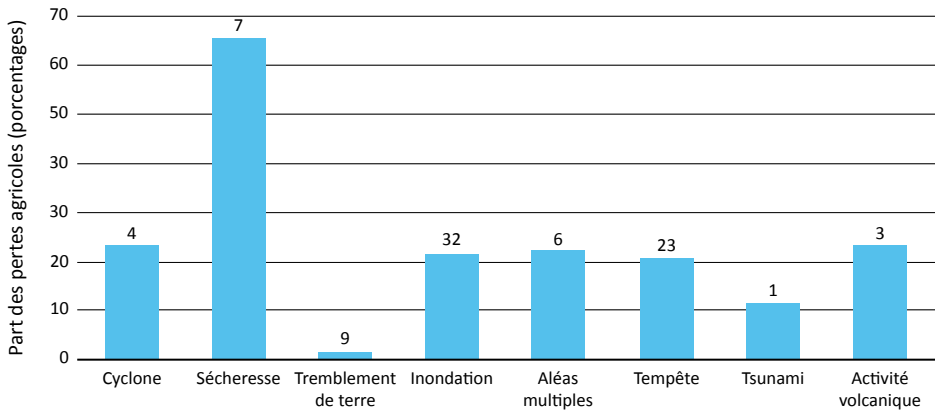
Sécurité alimentaire

Le changement climatique a un effet négatif sur l'agriculture, la sylviculture, la pêche et l'aquaculture, compromettant les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire de centaines de millions de personnes. Dans l'ensemble, les femmes, les enfants, les personnes âgées, les peuples autochtones et les communautés à faible revenu sont plus susceptibles de subir des pertes de moyens de subsistance, de la malnutrition et des coûts croissants. Ces impacts se manifestent de plusieurs façons.

Réduction de la productivité agricole : le changement climatique a ralenti la croissance de la productivité agricole au cours des cinquante dernières années, notamment dans les régions de moyenne et basse latitudes proches de l'équateur. Les conditions plus chaudes et sèches réduisent la qualité et la stabilité des récoltes. L'augmentation de la chaleur et de la sécheresse accroît également la mortalité des arbres et la perturbation des forêts, en particulier dans les zones tempérées et boréales, ce qui réduit les services d'approvisionnement dont dépendent de nombreuses populations. Le réchauffement des océans a diminué les rendements de certaines populations de poissons sauvages de 4,1 % entre 1930 et 2010. Les espèces aquatiques élevées en aquaculture sont également affectées par l'acidification et le réchauffement des océans.

Modifications des distributions géographiques et des saisons de croissance : le réchauffement climatique modifie la répartition spatiale des espèces cultivées et sauvages, ainsi que la période de floraison et d'émergence des insectes. Cela peut entraîner des décalages entre plantes et pollinisateurs et provoquer des pertes de récoltes dues au stress thermique dans les régions à basse latitude. Aux latitudes plus élevées, la saison de culture s'étend, mais le changement climatique modifie également la répartition des cultures, la temporalité des cycles biologiques et les interactions entre les plantes et les pollinisateurs (voir section 6.1).

Augmentation de la fréquence des pertes soudaines de production alimentaire : depuis le milieu du XX^e siècle, les événements climatiques extrêmes ont accru la fréquence des pertes de production soudaines, affectant tous les secteurs agricoles et les pêcheries, en particulier dans les régions vulnérables comme l'Afrique subsaharienne, l'Asie, les petits États insulaires et l'Amérique latine. De nouvelles menaces, telles que les invasions de sauterelles et de chenilles légionnaires, ou la prolifération de champignons toxiques sur les cultures, en raison de la hausse de la température et de l'humidité, ainsi que d'algues nocives, ont également été documentées⁴.



NOTE : Le chiffre affiché au-dessus de chaque barre correspond au nombre total de phénomènes.

Fig. 7.1 Part des pertes agricoles par types d'aléas en pourcentage (2007-2022)⁵.

Raréfaction des ressources hydriques : aujourd'hui, de graves pénuries d'eau affectent environ la moitié de la population mondiale durant au moins un mois par année, en particulier dans les pays à faible revenu. Ces pénuries sont notamment dues à des facteurs climatiques, mais sont aussi exacerbées par une gouvernance inadéquate de la ressource. En effet, le changement climatique intensifie le cycle hydrologique mondial, ce qui modifie les précipitations et entraîne des sécheresses prolongées et des précipitations extrêmes. La fonte accélérée des glaciers menace également les communautés de montagne et des régions arctiques qui en dépendent pour leurs ressources en eau. En plus des pénuries, ces perturbations du cycle de l'eau affectent la sécurité alimentaire et énergétique, et entraînent une recrudescence des maladies infectieuses d'origine hydrique, comme le choléra dans certaines régions.

Impacts physiques, santé et bien-être

Le changement climatique affecte également la santé physique et mentale dans toutes les régions, en impactant particulièrement les populations et les personnes les plus vulnérables (par exemple les personnes âgées, les jeunes enfants ou les populations socio-économiquement défavorisées). Différents types de problèmes de santé liés au changement climatique ont été identifiés.

Impacts physiques et mortalité liée aux événements extrêmes : la mortalité causée par les inondations, les sécheresses et les tempêtes est quinze fois plus élevée dans les pays très vulnérables par rapport aux moins vulnérables, avec une forte mortalité dans les régions les plus touchées par les sécheresses, en particulier en Afrique. Les vagues de chaleur et les températures élevées augmentent également

la mortalité et la morbidité, surtout pour les personnes travaillant en extérieur, et les heures de travail perdues à cause de la chaleur ont augmenté. Certaines régions approchent des limites physiologiques de tolérance au stress thermique.

Malnutrition et intoxications alimentaires : les événements climatiques extrêmes contribuent à la sous-nutrition, surtout en Afrique et en Amérique centrale. Celle-ci rend à son tour les individus plus vulnérables à d'autres problèmes de santé, y compris des problèmes mentaux et des performances cognitives réduites. Les risques d'infections alimentaires (salmonelles, toxines marines) augmentent avec les températures, avec des risques de contamination plus élevés.

Maladies infectieuses : le changement climatique étend également les zones favorables aux maladies à transmission vectorielle, c'est-à-dire par l'intermédiaire des piqûres d'insectes comme la dengue, le chikungunya, l'encéphalite à tiques ou le paludisme, causant des épidémies accrues dans certaines régions. Les maladies hydriques, telles que le choléra, augmentent avec la hausse des températures, les fortes pluies et les inondations, surtout dans les zones à faible sécurité hydrique et où les conditions sanitaires sont insuffisantes. La dégradation des habitats sauvages et le changement climatique favorisent aussi les zoonoses, transmises aux humains par les animaux, en augmentant les risques d'épidémie et de pandémie, en particulier dans les régions arctiques et subarctiques.

Maladies respiratoires chroniques : le changement climatique exacerbe des maladies respiratoires non transmissibles, par des expositions accrues à la chaleur, au froid, à la poussière, aux particules fines et aux allergènes. Les feux de forêt, par exemple, chargent l'atmosphère en particules fines et augmentent les risques cardiovasculaires et respiratoires.

Problèmes de santé mentale : la hausse des températures, les événements climatiques extrêmes et la perte de moyens de subsistance entraînent un stress psychologique et des troubles mentaux. Certaines personnes éprouvent également de la détresse et des états anxieux face à la dégradation de l'environnement (éco-anxiété).

Migration et déplacements

Le changement climatique est un facteur croissant de migration et de déplacements forcés. Les causes de la migration climatique peuvent être **directes**, par exemple la destruction des habitations et des infrastructures par des événements climatiques extrêmes, ou **indirectes**, comme la détérioration des conditions économiques ou de la sécurité alimentaire, le plus souvent dans les régions rurales. L'impact du changement climatique sur les migrations varie en fonction du contexte social, politique et économique. La plupart des déplacements et des migrations liés au climat ont cours **à l'intérieur des frontières nationales**, et les mouvements internationaux se produisant principalement entre pays frontaliers. Les migrations peuvent être de **courte durée** ou de **longue durée**, et s'effectuent le plus souvent du milieu rural vers

les milieux urbains, ou de manière interne au milieu rural. Les migrations temporaires ou saisonnières sont principalement une réponse à des conditions économiques péjorées qui demandent une diversification des activités comme stratégie de réduction des risques.

Depuis 2008, en moyenne 20 millions de personnes ont été déplacées chaque année à cause d'événements climatiques extrêmes, tels que des sécheresses, des tempêtes, des cyclones, des pluies abondantes et des inondations⁶. Les régions les plus touchées sont l'Asie du Sud, du Sud-Est et de l'Est, suivie de l'Afrique subsaharienne, même si les petits États insulaires sont également affectés.

Bien que rare, la relocalisation planifiée par les gouvernements de populations exposées à des risques climatiques, comme dans le cas des populations indigènes en Alaska ou des villages dans les îles Salomon et Fidji, est aussi une forme de migration qui peut entraîner des souffrances financières et émotionnelles en raison de la perte de liens culturels et spirituels avec le lieu d'origine.

Villes et infrastructures

À l'échelle mondiale, plus de personnes vivent aujourd'hui dans les zones urbaines que dans les zones rurales. La population urbaine mondiale a connu une croissance rapide depuis 1960, passant de 1 milliard à 4,6 milliards en 2023⁷. À cette même date, 55 % de la population mondiale vivait en zone urbaine et les projections indiquent qu'en 2050, la part de la population vivant en ville sera de 68 %⁸.

Les villes sont de plus en plus exposées aux aléas climatiques comme la montée du niveau de la mer, les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations, les feux de forêt et le dégel du pergélisol qui déstabilise les constructions. Les **villes côtières**, où se trouvent environ 10 % de la population mondiale, ainsi que les régions montagneuses et les zones informelles, non planifiées et sans services publics, sont particulièrement touchées par les impacts du changement climatique. Elles sont confrontées à des coûts de protection élevés et des changements systémiques, comme la relocalisation de populations, pourraient y être nécessaires. Les événements climatiques extrêmes perturbent également les **infrastructures critiques** telles que l'approvisionnement en énergie, en eau, les communications et les transports. Les interconnexions entre infrastructures créent de nouveaux risques, avec des impacts pouvant s'étendre au-delà des zones touchées initialement.

Économie

Les impacts du changement climatique décrits dans les autres catégories ci-dessus affectent également l'économie, avec des variations selon les secteurs et les régions. Par exemple, les événements météorologiques extrêmes entraînent des coûts élevés liés aux **dommages matériels**, les effets du changement climatique sur la productivité de l'agriculture affectent les **revenus agricoles**, qui deviennent plus faibles et plus incertains, et les perturbations de la **disponibilité en eau**, entraînant des

conséquences pour les secteurs qui en dépendent comme l'agriculture, la production d'énergie et les industries manufacturières. À cela, on peut ajouter les effets sur l'économie du **stress thermique** lié aux vagues de chaleur, qui diminue la productivité des travailleuses et travailleurs exerçant à l'extérieur, ainsi que **la perturbation des chaînes d'approvisionnement** pour les secteurs industriels et les services, ce qui engendre des ralentissements de production et donc des pertes économiques. De manière générale, les secteurs économiques les plus touchés sont l'agriculture, la sylviculture, la pêche, l'énergie et le tourisme. Comme pour les autres catégories d'impact, les régions peu développées et les populations les plus vulnérables sont affectées de manière disproportionnée par les effets du changement climatique sur l'économie. Par exemple, les petits États insulaires ont signalé des pertes économiques élevées à la suite de cyclones et de l'élévation du niveau de la mer, ce qui fragilise fortement leurs économies. De manière générale, il est estimé que le changement climatique a ralenti la tendance à la réduction des inégalités économiques entre les pays à revenu élevé et les pays à faible revenu, avec des effets particulièrement négatifs pour l'Afrique.

Culture et modes de vie traditionnels

Le changement climatique a des effets profonds et variés sur les cultures traditionnelles, notamment dans les communautés autochtones, les régions montagneuses et arctiques, où les liens culturels avec la nature et l'eau sont essentiels. La fonte des glaciers et la diminution des neiges menacent les ressources en eau, indispensables pour certaines **pratiques culturelles et spirituelles** locales. La modification des régimes hydrologiques causée par le recul des glaces et le dégel du pergélisol augmente les risques de glissements de terrain et d'inondations soudaines, perturbant les **modes de vie traditionnels** et la sécurité des communautés. Le changement climatique, associé aux changements d'utilisation des terres et à la pollution de l'eau, entraîne également la perte et la dégradation d'écosystèmes culturellement importants. Le changement climatique affecte également la **diversité culturelle et linguistique** des peuples autochtones, car de nombreux termes et expressions culturelles sont directement liés à leur environnement naturel. Avec la dégradation de cet environnement, des éléments linguistiques et culturels risquent de disparaître car les savoirs et pratiques qui y sont associés ne sont plus pertinents dans des écosystèmes altérés. Comme déjà mentionné plus haut, les déplacements forcés des populations côtières, par exemple en Alaska et dans les îles du Pacifique, fragilisent les **liens culturels, spirituels et identitaires avec leurs terres d'origine**, entraînant des souffrances émotionnelles et financières. Malgré les risques climatiques, certaines communautés choisissent de ne pas migrer pour protéger leur culture et leur attachement aux terres ancestrales. Cette immobilité représente une décision volontaire de préserver les biens culturels immatériels,

même si cela signifie une vulnérabilité accrue face aux risques climatiques. Dans les cas les plus extrêmes comme celui de certains petits États insulaires de basse altitude (par exemple Tuvalu ou Kiribati), c'est l'ensemble du territoire d'une population qui pourrait disparaître à l'avenir, soumettant ainsi ces communautés et leur culture à des **risques existentiels**.

Impacts positifs

Le changement climatique, bien que majoritairement associé à des effets négatifs, peut dans certains cas produire des impacts positifs, selon les régions du monde et les secteurs économiques concernés. Toutefois, ces bénéfices potentiels sont limités dans le temps et inégalement répartis à l'échelle mondiale.

L'un des impacts positifs souvent évoqués concerne l'agriculture dans les zones froides de l'hémisphère nord, comme le Canada, la Russie ou certaines régions de Scandinavie. Le réchauffement global peut entraîner un allongement de la saison de croissance, permettant de cultiver de nouvelles espèces végétales ou d'augmenter le nombre de récoltes annuelles. De même, le réchauffement pourrait réduire les besoins en chauffage dans les pays tempérés ou froids, engendrant une baisse des dépenses énergétiques domestiques et une réduction locale des émissions de GES liées au chauffage.

Sur le plan économique, la fonte des glaces en Arctique ouvre des opportunités commerciales avec de nouvelles routes maritimes plus courtes entre l'Europe et l'Asie. Cela pourrait réduire les coûts de transport et favoriser certains ports du Nord. Le tourisme pourrait également bénéficier de conditions climatiques plus clémentes dans des régions auparavant jugées trop froides ou peu attractives, comme certaines zones montagneuses ou côtières du nord de l'Europe.

Cependant, ces impacts positifs ont des **limites importantes**. Ils sont souvent temporaires et peuvent être annulés par des effets négatifs à plus long terme, comme la perte de biodiversité, la dégradation des sols ou l'augmentation des événements climatiques extrêmes. Par exemple, même si certaines régions du Nord bénéficient d'une saison agricole prolongée, elles seront également soumises à d'autres types d'impacts (par exemple fonte du pergélisol et déstabilisation des infrastructures, feux de forêt, etc.), ce qui signifie que le bilan net des impacts sera très certainement également négatif pour elles à long terme.

De plus, ces bénéfices sont **inégalement répartis**. Les pays du Nord, plus industrialisés et dotés d'infrastructures solides, sont davantage en mesure de s'adapter et de tirer parti de certains effets du réchauffement. En revanche, les pays du Sud, souvent plus vulnérables, sont confrontés à des défis majeurs sans disposer des ressources nécessaires pour y faire face. Cette disparité accentue les inégalités mondiales et soulève des enjeux éthiques et politiques cruciaux qui seront traités dans le chapitre suivant.

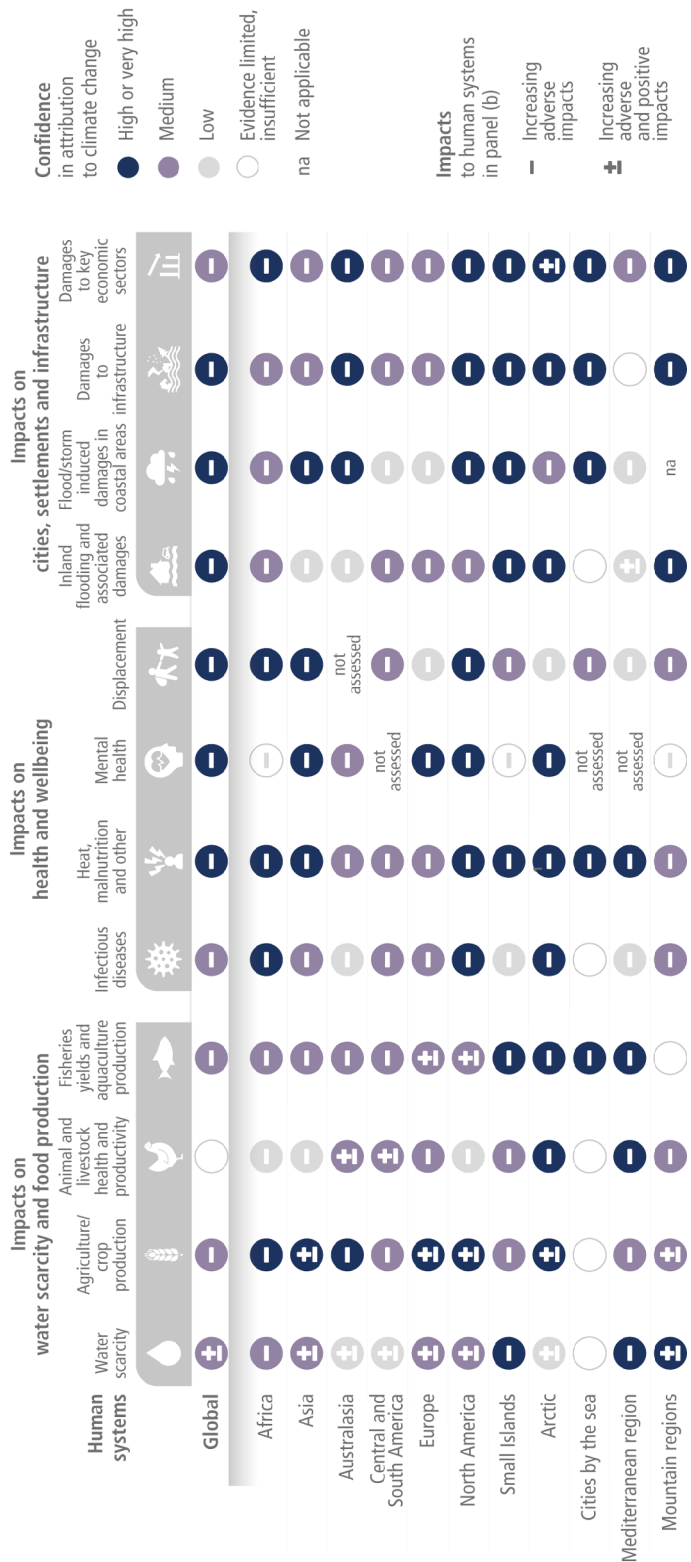


Fig. 7.2 Impacts observés sur les sociétés humaines⁹.

7.2 Risques climatiques

La notion de risque

Encadré 7.1 Qu'est-ce que le risque ?

La notion de risque renvoie à la probabilité qu'un événement dommageable se produise et affecte des personnes, des biens, ou l'environnement. Contrairement aux impacts observés déjà bien réels, elle est tournée vers les conséquences potentielles du changement climatique dans le futur proche et lointain. La notion de risque est centrale dans les domaines de la gestion de crises, de la sécurité, et de la prévention des catastrophes. Elle intègre trois dimensions essentielles : l'**aléa** (*hazard* en anglais), l'**exposition** et la **vulnérabilité**. Ces trois éléments interagissent pour déterminer l'ampleur et l'impact potentiels d'un risque (voir figure 7.3).

L'**aléa** est la manifestation d'un phénomène naturel, technologique, ou humain susceptible de causer des dommages. Il peut s'agir de phénomènes naturels (séismes, inondations, cyclones), d'accidents technologiques (explosions, fuites toxiques) ou encore de menaces anthropiques (conflits, attaques terroristes). L'aléa se caractérise par sa nature, son intensité, sa durée, et sa probabilité d'occurrence. Par exemple, dans une région sismique, l'aléa serait la probabilité de secousses de forte intensité. Dans le cas du changement climatique, les divers aléas sont les **événements extrêmes** et les **processus lents et graduels** mentionnés au début de la section précédente. La simple existence d'un aléa ne suffit pas à créer un risque. Cela dépend également de l'existence de personnes ou de biens exposés à cet aléa.

L'**exposition** désigne la présence de personnes, d'infrastructures, d'écosystèmes ou d'activités économiques dans des zones susceptibles d'être touchées par un aléa. Une forte densité de population, des installations industrielles ou des infrastructures stratégiques implantées dans une telle zone sont des facteurs d'exposition élevés. Le niveau d'exposition est directement proportionnel aux pertes potentielles : plus une zone densément peuplée et économiquement active est exposée, plus l'impact d'un aléa pourrait être dévastateur. Dans le contexte du changement climatique, l'exposition dépend donc de facteurs à la fois **climatiques** (probabilité des aléas dans une zone donnée), **géographiques** (localisation et densité de la population) et **topographiques** (caractéristiques du territoire). La Floride, par exemple, est beaucoup plus exposée aux cyclones que la Suisse, qui est elle-même plus exposée aux glissements de terrain que la Belgique. Néanmoins, une forte exposition n'entraîne pas nécessairement des conséquences graves si la vulnérabilité est faible, ce qui nous amène à la troisième dimension du risque.

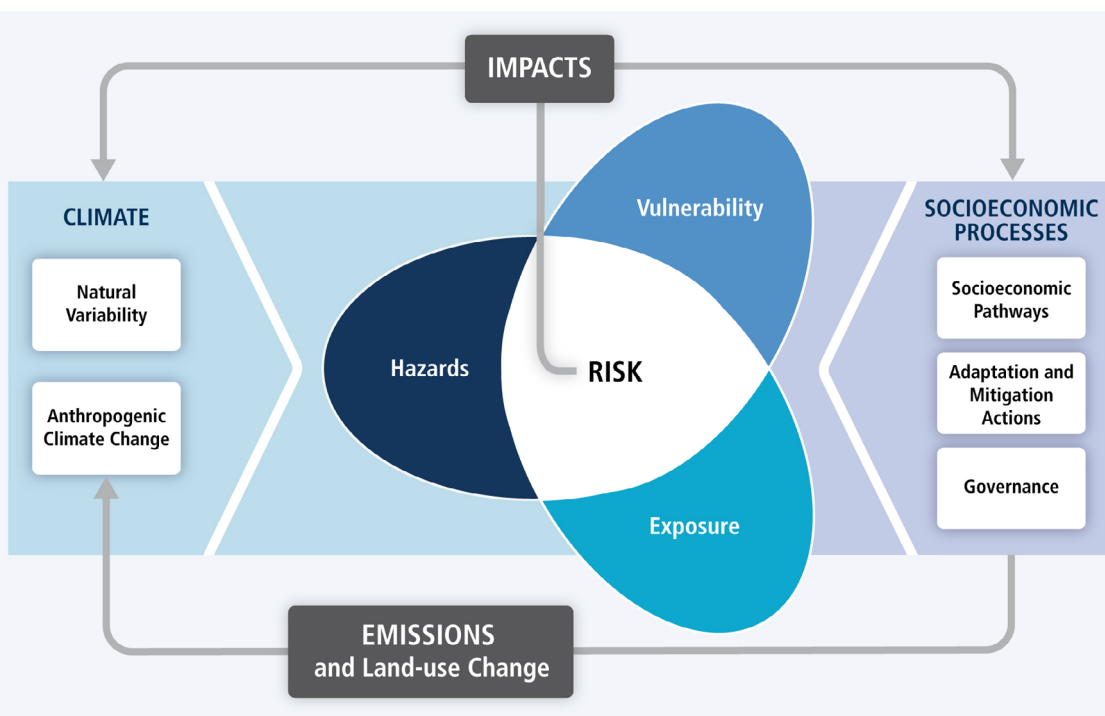


Fig. 7.3 La notion de risque¹⁰.

La **vulnérabilité** se réfère au niveau de protection, d'une population, d'un bien ou d'un système, contre les impacts associés à un aléa. Une vulnérabilité forte implique un manque de protection contre les impacts, alors qu'une vulnérabilité faible indique une bonne capacité à s'en prémunir. La vulnérabilité dépend avant tout de facteurs **techniques et infrastructurels** (solidité des bâtiments, robustesse des réseaux d'eau, d'énergie, etc.), **sociaux et organisationnels** (niveau de formation de la population pour réagir face aux urgences) et **économiques** (capacité financière des individus et des institutions à absorber des coûts financiers). Ainsi, deux populations également exposées à la montée du niveau des mers, par exemple les Pays-Bas et le Bangladesh, pourront avoir des niveaux de vulnérabilité très différents. Dans cet exemple les Pays-Bas possèdent plus de moyen techniques, financiers et d'expertise pour se protéger derrière des digues. Ce pays est donc beaucoup moins vulnérable que le Bangladesh¹¹. Contrairement à l'exposition, la vulnérabilité est donc une notion avant tout socio-économique. Les populations défavorisées, par exemple, sont souvent plus vulnérables aux catastrophes car elles ont moins accès aux ressources nécessaires pour s'en protéger.

Le risque se situe à l'intersection de ces trois dimensions. Un aléa peut être particulièrement intense, mais si aucune population n'y est exposée ou si une population

est bien préparée et résiliente, le risque global reste limité. À l'inverse, une forte exposition combinée à une grande vulnérabilité, même en présence d'un aléa de faible intensité, peut générer des impacts catastrophiques. Par exemple, un cyclone de faible intensité dans une zone densément peuplée et où les constructions ne respectent pas les normes de sécurité pourrait avoir des conséquences humaines et économiques dramatiques. La gestion du risque vise donc à réduire l'impact potentiel des aléas en diminuant l'exposition, par exemple, en interdisant les constructions dans les zones inondables, ou en réduisant la vulnérabilité, par le renforcement des infrastructures et la sensibilisation des populations. C'est précisément ce que visent à faire les stratégies d'**adaptation** au changement climatique (voir section 10.2). Il est à noter que si, dans ce contexte, les risques découlent généralement des **impacts potentiels** du changement climatique, ils peuvent également être liés à des stratégies d'adaptation inappropriées qui seraient mises en œuvre pour y répondre. On parle dans ce cas de **maladaptation**, notion définie par le Giec comme une « action susceptible d'accroître le risque de conséquences négatives liées au climat, notamment par le biais [...] d'une vulnérabilité accrue ou différente au changement climatique, de situations plus inéquitables ou d'une diminution du bien-être¹² ».

Exemples de risques projetés

Les risques climatiques concernent les mêmes types d'impacts que les impacts déjà observés et mentionnés dans la section précédente, mais de manière plus intense, plus fréquente, et à plus grande échelle, avec l'émergence possible d'effets et d'impacts en cascade qui deviendront de plus en plus difficiles à gérer. À **court terme**, l'évolution des risques climatiques dépendra plus de l'évolution de l'exposition et de la vulnérabilité des sociétés aux aléas climatiques que des niveaux d'émissions de GES. Compte tenu de l'inertie du système climatique, les changements attendus dans les deux décennies à venir dépendent en effet avant tout des émissions passées. À plus **long terme**, l'évolution du risque dépendra à la fois de la trajectoire d'émissions empruntée par l'humanité, des tendances de développement socio-économique et des stratégies d'adaptation mises en place. Selon le Giec, les modèles de développement actuels, souvent insoutenables, contribuent à accroître l'exposition et la vulnérabilité des populations et des écosystèmes face aux aléas climatiques. Par exemple, l'urbanisation croissante, notamment dans les zones côtières et les zones basses, entraîne une plus grande exposition aux événements extrêmes, comme les inondations et la montée du niveau de la mer. De plus, l'urbanisation accroît les épisodes de chaleur extrême et l'intensité du ruissellement des précipitations¹³. Les risques augmentent également avec chaque fraction de degré supplémentaire. Et si toutes les régions du monde seront soumises à des risques climatiques, elles le seront de manière différenciée (figure 7.4). Comme le montre le graphique suivant, les risques deviennent très importants à partir d'un réchauffement de 1,5 °C à 2 °C, ici pour l'Afrique et la région méditerranéenne.

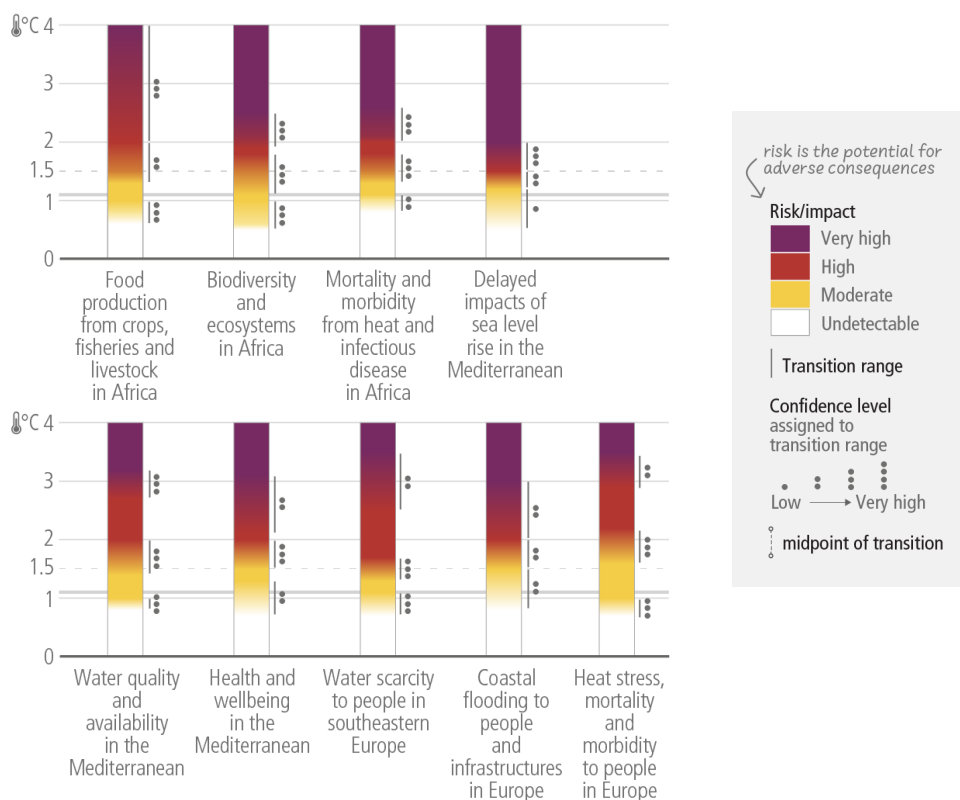


Fig. 7.4 Risques en fonction de la température pour les systèmes humains et naturels¹⁴.

Voici quelques exemples tirés du sixième rapport du Giec publié en 2022¹⁵.

Sécurité alimentaire : d'ici 2100, selon un scénario d'émissions élevé (SSP5-8.5, voir encadré 3.1), plus de 30 % des terres cultivables actuelles pourraient devenir inadaptées pour l'agriculture. Selon ce même scénario, la biomasse animale des océans pourrait diminuer de 15,5 % \pm 8,5 % d'ici la fin du siècle, mettant en péril les populations dépendant des ressources halieutiques.

Eau : à 2 °C de réchauffement global, plus d'un tiers de la population du sud de l'Europe sera exposé à des pénuries d'eau, un risque qui double à 3 °C de réchauffement, entraînant également des pertes économiques importantes.

Élévation du niveau de la mer : plus de 1 milliard de personnes vivant en zones côtières seront exposées à des aléas climatiques d'ici 2050. Même si le réchauffement s'arrêterait rapidement (ce qui est hautement improbable), ces risques continueraient de croître après 2050 et au-delà de 2100. Sans adaptation significative, les risques pour les villes côtières pourraient être multipliés par dix d'ici 2100.

Santé : le changement climatique pourrait mettre entre 8 millions (SSP1-6.0) et 80 millions de personnes (SSP3-6.0) en situation de famine d'ici le milieu du siècle, avec une concentration des impacts en Afrique subsaharienne, en Asie du Sud et en Amérique centrale. Le nombre de personnes à haut risque de mortalité liée à la chaleur en Europe devrait tripler avec un réchauffement global de 3 °C, par rapport à un réchauffement de 1,5 °C seulement. Le risque augmente donc plus rapidement que la température.

Villes et infrastructures : l'exposition de la population urbaine en Afrique à des vagues de chaleur extrême devrait passer de 2 milliards de jours-personnes¹⁶ par an actuellement, à 95 milliards de jours-personnes avec un réchauffement de 2,8 °C. D'ici 2050, 69 % des infrastructures dans la région arctique seront affectées par la fonte du pergélisol, impactant plus de 1200 établissements et 36 000 bâtiments, ce qui pourrait concerner environ 4 millions de personnes en Europe sous un scénario de réchauffement moyen.

Économie : sous un scénario de réchauffement global de plus de 4 °C et avec une adaptation limitée, la diminution du PIB mondial annuel en 2100 pourrait dépasser les pertes économiques de la Grande Récession de 2008-2009 et de la pandémie de Covid-19 de 2020.

Distribution inégale des risques climatiques

Une des caractéristiques centrales des risques climatiques est qu'ils ne sont pas répartis de manière uniforme. Les **inégalités de distribution des risques** proviennent à la fois d'une répartition inégale de l'exposition aux aléas climatiques et d'une répartition inégale de la vulnérabilité. Ces inégalités peuvent être observées à différentes échelles. On peut par exemple avoir des expositions très différentes aux inondations entre régions et pays, mais également au niveau très local entre différents quartiers, voire différentes rues, d'une même ville. De manière similaire, les différences en matière de vulnérabilité étant en grande partie le reflet des inégalités socio-économiques, celles-ci se manifestent à l'échelle des pays, mais également au sein d'une même population. Ce sont donc en général les **populations les plus pauvres** qui sont les plus vulnérables et souvent également les plus exposées, aux effets néfastes des changements climatiques. D'autre part, la combinaison de risques climatiques et non climatiques rend leur gestion encore plus complexe. Les effets du changement climatique sur la santé, la productivité agricole, les ressources en eau et l'économie sont, et seront encore plus à l'avenir, particulièrement importants sur les ménages à faibles revenus, dans les pays à faibles et moyens revenus d'Afrique subsaharienne, d'Asie du Sud et d'Amérique centrale¹⁷.

Le changement climatique a donc un rôle à la fois d'**amplification des risques** préexistants et de **renforcement des inégalités** socio-économiques. Avec chaque degré de réchauffement, les risques climatiques deviennent plus inéquitables, en particulier en l'absence de politiques climatiques permettant de renforcer suffisamment les

besoins d'adaptation des pays à faible revenu. Des politiques d'atténuation et d'adaptation insuffisantes ont donc pour conséquence la mise en place d'un véritable cercle vicieux, au sein duquel les sociétés et les populations défavorisées subissent une part grandissante des impacts, ce qui mène à un renforcement supplémentaire de leur vulnérabilité et de leur précarité, et ainsi de suite. Les paragraphes suivants donnent quelques exemples de répartition inégale de l'exposition et du risque.

Exposition à la hausse du niveau de la mer : en utilisant un modèle d'élévation de terrain, Kulp et Strauss¹⁸ estiment que 190 millions de personnes habitent actuellement sur des terres situées en dessous de la ligne de marée haute projetée pour 2100, et ceci si le niveau d'émissions de GES reste faible. En cas d'émissions élevées de GES, ce sont jusqu'à 340 millions de personnes qui vivront sur des terrains inondables en 2050, et jusqu'à 630 millions d'ici la fin du siècle. La figure 7.5 montre bien que la grande majorité de ces personnes sont concentrées en Asie du Sud, de l'Est et du Sud-Est (en jaune), en raison non seulement du nombre élevé de kilomètres de ligne de côte et de la topographie du terrain, mais aussi des grandes concentrations de population vivant près de la mer dans ces régions.

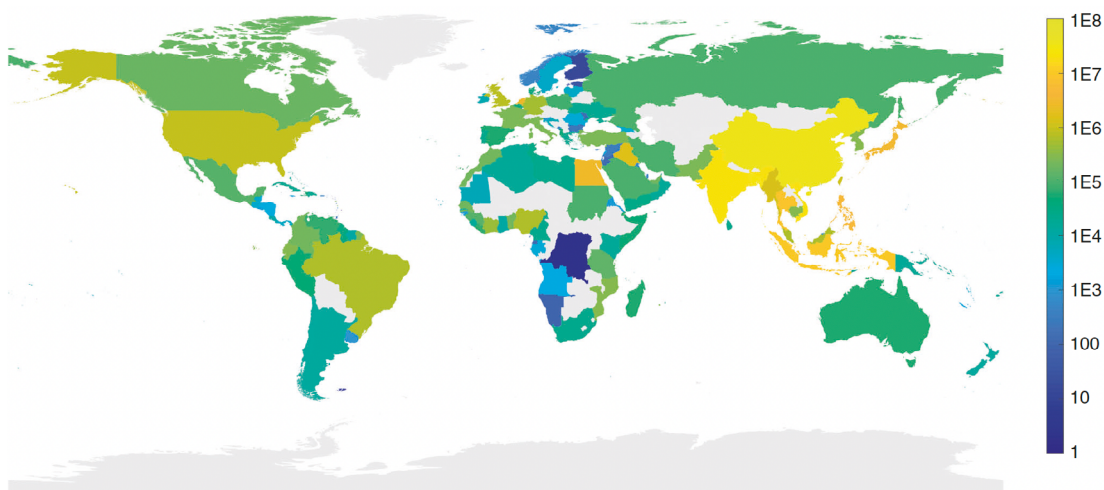


Fig. 7.5 Population exposée à la hausse du niveau des mers en 2050¹⁹.

Exposition au stress thermique : la capacité du corps humain à évacuer la chaleur dépend non seulement de la température extérieure, mais également de l'humidité relative qui, passé un certain niveau, empêche la transpiration de jouer son rôle de rafraîchissement. Les projections climatiques permettent d'évaluer quelles régions de la planète seraient soumises, d'ici la fin du siècle, à des conditions de température et d'humidité mortelles²⁰. La figure 7.6 montre que même pour un scénario d'émissions médian, voire à faibles émissions, de nombreuses régions du monde seront soumises à des conditions de température et d'humidité mortelles plus de 200 jours par an, les rendant pratiquement inhabitables. Des régions très peuplées d'Afrique de l'Ouest, d'Inde ou d'Asie du Sud-Est en font partie.

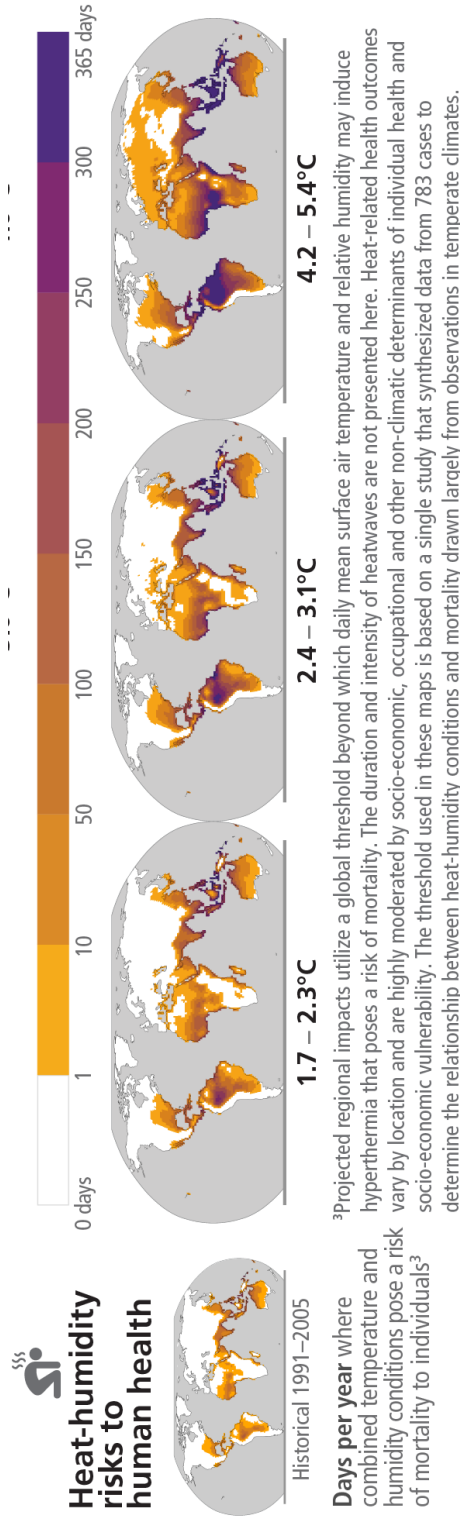


Fig. 7.6 Risques pour la santé humaine liés à la chaleur et à l'humidité²¹.

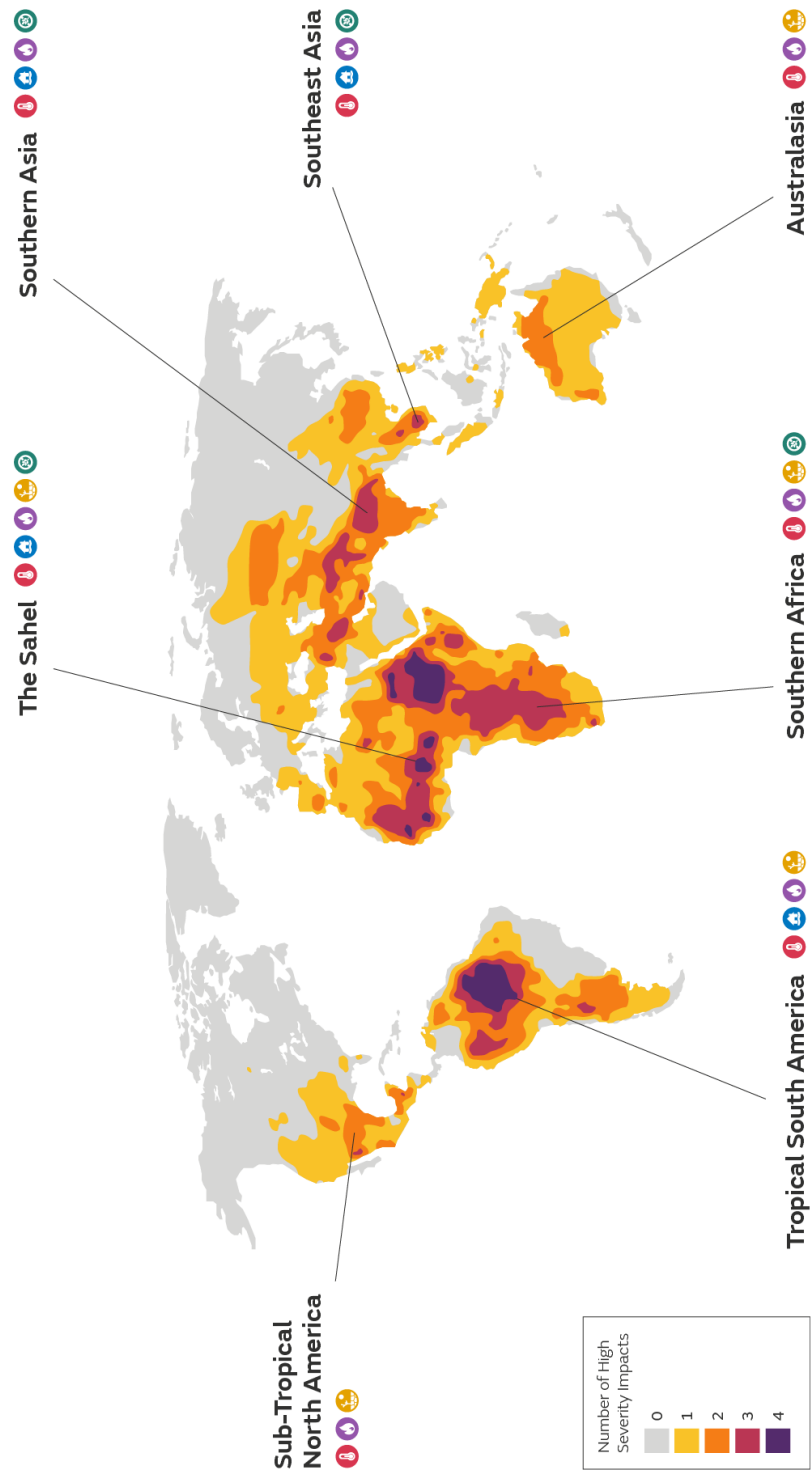


Fig. 7.7 Exposition à de multiples impacts extrêmes pour un réchauffement de 4 °C²².

Dans le même ordre d'idées, le Met Office, le service météorologique national du Royaume-Uni, propose une série de cartes montrant la répartition géographique de différents types d'événements extrêmes (figure 7.7). Ici encore l'exposition des pays à faible et moyen revenu apparaît comme particulièrement élevée dans l'hypothèse d'une augmentation très élevée de la température de 4 °C.

Dans les exemples mentionnés ci-dessus, toutes les régions exposées à ces aléas ne seront toutefois pas impactées de la même manière, puisque leur vulnérabilité peut varier substantiellement. Certaines grandes villes côtières en Chine auront les moyens de se prémunir contre la montée du niveau des mers, alors que les Philippines, par exemple, auront plus de difficulté à y faire face. De même, l'exposition aux chaleurs extrêmes se traduira très différemment selon les types de construction, la disponibilité ou non de systèmes de rafraîchissement et les politiques de prévention mises en place.

Certaines analyses permettent de tenir compte à la fois de l'augmentation future de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques, de l'exposition et de la vulnérabilité des différents pays. La plateforme Inform Risk de la Commission européenne permet ainsi de visualiser les niveaux de risque associés à différents types d'aléas naturels et humains (figure 7.8). L'outil permet notamment d'analyser la manière dont le risque pourrait évoluer dans le futur en raison du changement climatique. La carte suivante représente la répartition du risque projetée pour 2080, selon un scénario d'émissions moyen (RCP4.5), en prenant en compte l'exposition et la vulnérabilité. On peut y voir que les risques se concentrent très majoritairement sur les pays à revenu faible et moyen inférieur.

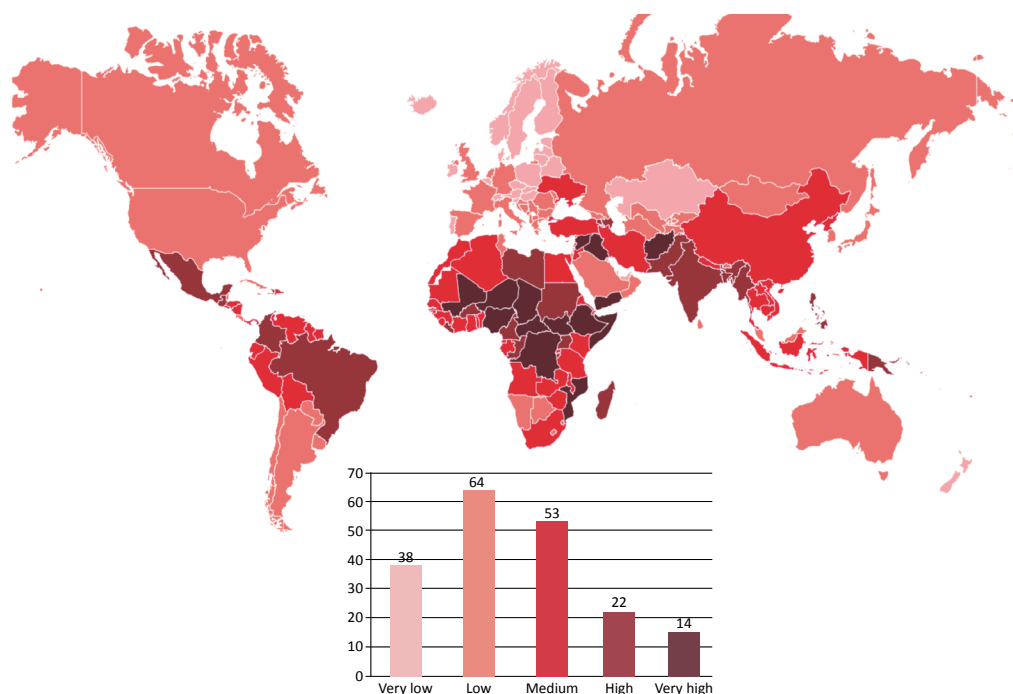


Fig. 7.8 Répartition globale du risque associé au changement climatique²³.

8. Questions de justice climatique

Dans la partie précédente, nous avons vu que les impacts observés du changement climatique et les risques qui lui sont associés sont répartis de manière très inégale parmi les différentes régions et populations de la planète. Les populations les plus vulnérables, qui vivent souvent dans des régions particulièrement exposées aux événements extrêmes, sont les plus touchées par les conséquences du changement climatique, alors même qu'elles ont en général moins contribué aux causes du problème. Cela pose d'évidentes questions de justice, qui jouent un rôle central dans les négociations internationales sur le changement climatique et dans les réflexions sur les réponses à apporter à ce problème. La notion de **justice climatique** est toutefois plus vaste que la simple question de la répartition des impacts et touche à diverses dimensions du problème, telles que la juste allocation du budget carbone ou du financement des politiques climatiques, qui vont être abordées ici.

Après une première section qui définit plus en détail la notion de justice et ses différentes dimensions, cette partie passe en revue certaines des questions les plus importantes en la matière, notamment de distribution équitable du budget carbone, de coût des politiques de lutte contre le changement climatique et de procédures de prise de décision dans les instances de gouvernance internationales.

8.1 La notion de justice

Encadré 8.1 Qu'entend-on par justice ?

Dans sa conception la plus large, la notion de justice désigne l'ensemble des principes, valeurs et règles qui visent à organiser la vie en société de manière **équitable**. Elle cherche à garantir que chaque individu reçoive ce qui lui est dû en fonction de critères considérés comme **impartiaux**, c'est-à-dire qui ne sont pas fondés sur des préférences personnelles mais sur des principes généraux largement partagés, qui sont ensuite appliqués à des cas concrets. Si le terme « justice » renvoie souvent à la loi et à son application par le pouvoir judiciaire, c'est une approche plus philosophique de la justice qui est privilégiée ici. La philosophie politique, en tant que discipline, s'interroge en effet sur la définition de la justice, ses différentes conceptions possibles, les principes auxquels elle devrait répondre, ainsi que sur la manière de justifier ces éléments par une argumentation rationnelle. Les différentes conceptions de la justice sont souvent exposées sous forme de **théories de la justice**, formulées de manière assez générale mais pouvant s'appliquer à des domaines particuliers

tels que le changement climatique. Cette approche de la justice climatique est aujourd'hui un domaine de recherche bien établi. Les développements qui suivent sont donc fondés avant tout sur les débats existant dans la littérature académique et non sur l'analyse des revendications des mouvements sociaux qui se réclament de la justice climatique, bien qu'il y ait souvent un recouplement entre les deux.

Les réflexions au sujet de la justice, et en particulier de la justice climatique, sont souvent déclinées en trois catégories, qui sont des dimensions distinctes mais complémentaires de ce qui constitue une société juste et les moyens d'y parvenir : la justice **distributive**, la justice **procédurale** et la justice **comme reconnaissance**¹.

Justice distributive

La justice distributive concerne la répartition de quelque chose, conformément à un principe d'allocation, au sein d'un collectif. Elle vise à garantir une distribution équitable, de manière que chaque partie prenante obtienne ce qui lui revient. Pour prendre un exemple classique, lorsque des convives assis autour d'une table doivent se partager un gâteau, l'approche par la justice distributive se demandera quelle est la part équitable qui revient à chaque personne.

Il existe une variété potentiellement illimitée de choses que l'on peut vouloir distribuer de manière équitable. Le sujet le plus classique est la manière de distribuer les **revenus et la richesse** au sein d'une société, mais on peut également réfléchir à la distribution équitable des **droits** (droits humains, politiques, etc.) ou des **ressources** (naturelles ou non), par exemple, ou de choses connotées plus négativement comme des **coûts**, des **charges** de travail ou des **nuisances**.

Il existe également une variété de principes d'allocation (ou principes de justice) possibles pour définir ce qui constitue une répartition équitable. Certaines théories favorisent l'**égalité stricte**, où chaque personne reçoit la même chose (le gâteau est divisé en parts égales) ; d'autres valorisent une équité proportionnelle, où la répartition tient compte des **mérites** (la personne qui a acheté le gâteau en mérite une part plus grande) ou des **besoins** spécifiques (les personnes qui ont très faim ou des besoins spécifiques en apports caloriques reçoivent plus). On peut ajouter à cela le principe de la **priorité aux personnes les plus défavorisées** (les plus pauvres obtiennent une part plus grande du gâteau) ou celui consistant à définir un **seuil de suffisance** dans l'accès à certains biens auxquels tout le monde devrait avoir droit (une fois que tout le monde a eu une part jugée suffisante, le reste du gâteau peut être distribué indifféremment). L'équité n'est donc pas forcément synonyme d'égalité dans les questions de justice distributive. Le principe d'allocation choisi peut par ailleurs être différent selon la chose qui est distribuée. On pourrait par exemple considérer que la manière la plus équitable de distribuer les corvées de nettoyage des lieux communs dans une collocation est l'égalité stricte, alors que les coûts de

chauffage doivent être répartis proportionnellement à la surface de chambre occupée par chaque locataire.

Il y a finalement aussi une grande variété de parties prenantes différentes dans les questions de justice. Si les théories de la justice distributive se sont traditionnellement intéressées à la répartition juste des ressources (économiques, sociales, politiques, etc.) parmi les membres d'une même *société* ou d'un même pays, ces dernières décennies ont vu un élargissement du périmètre des considérations de justice au niveau *global* (juste distribution au sein de la population mondiale), au niveau *intergénérationnel* (juste distribution entre les générations) et plus récemment au niveau *écologique* (juste distribution entre humains et non-humains). De plus, les questions de distribution peuvent s'appliquer aux *individus*, quelle que soit l'échelle considérée, aux *pays* entre eux, ou à tout autre type de *collectifs* (par exemple les entreprises).

Il faut donc retenir ici que pour analyser une situation sous l'angle de la justice distributive il est nécessaire de définir une *métrique* (qu'est-ce qui est distribué?), un *principe d'allocation* (comment le distribuer de manière équitable?), ainsi qu'un *périmètre* (qui est concerné par la distribution et à quelle échelle?).

Justice procédurale

La justice procédurale concerne, quant à elle, les processus et les règles qui mènent aux prises de décisions collectives. Plutôt que de s'intéresser au résultat de la répartition des biens, des droits, ou d'autres choses, elle se focalise le plus souvent sur la transparence, l'égalité de traitement et la légitimité des procédures utilisées pour parvenir à des décisions, entre autres d'ailleurs pour décider quel principe d'allocation équitable utiliser. La justice procédurale est essentielle dans le domaine juridique où il est crucial que les lois et les règlements soient appliqués de manière impartiale et que les décisions soient prises selon des normes établies et prévisibles. Mais les réflexions s'appliquent également à la prise de décision politique, en particulier dans le cadre démocratique.

Dans ce contexte, il existe deux types généraux de critères de justice procédurale. Le critère dit *instrumental* considère qu'une procédure de prise de décision (par exemple le vote majoritaire) est juste si elle tend à produire des résultats qui sont eux-mêmes justes. Le critère *intrinsèque* présuppose en revanche que certaines procédures (par exemple démocratiques) sont bonnes en elles-mêmes indépendamment des résultats qu'elles produisent. Selon cette optique, dans le cadre démocratique, une procédure qui permet à toutes les personnes concernées de faire valoir leur avis et de peser sur la décision, *via* le vote, sera davantage perçue comme juste et comme contribuant à la légitimité des décisions. Cela aide les individus à accepter des résultats parfois défavorables, car ils savent qu'ils ont été traités de manière juste.

Un principe fréquemment discuté dans le cadre de la justice procédurale est le *principe des affectés*, qui demande que les intérêts de toutes les personnes (ou entités) affectées par une décision soient pris en compte dans l'élaboration de cette décision (par exemple une nouvelle politique sociale ou environnementale). On peut

distinguer ici les personnes qui sont affectées **légalement** par une décision, c'est-à-dire qui sont tenues de la respecter, de celles qui sont affectées **causalement**. Par exemple, la décision, dans un pays donné, d'interdire l'importation de biens de consommation produits dans des conditions de travail jugées indignes aura des conséquences légales pour les citoyennes et citoyens de ce pays (qui ne pourront plus acheter ou faire commerce de ces biens), mais également des conséquences causales, positives et négatives, hors des frontières (renforcement de la protection des travailleuses et travailleurs, pertes de commerces, etc.). Les problèmes environnementaux globaux, tels que le changement climatique, qui ont par définition une portée globale et intergénérationnelle, posent donc de nombreuses questions sur la meilleure manière de prendre les décisions collectivement en tenant compte des intérêts de toutes les parties affectées. La question centrale du principe des affectés est de savoir si les personnes ou entités affectées doivent simplement avoir la possibilité d'exprimer leurs intérêts et de s'assurer que leur voix est prise en compte, ou si elles devraient pouvoir participer à la décision, directement ou par représentation. Ce débat n'est bien sûr pas tranché et il existe un grand nombre de solutions intermédiaires possibles entre ces deux options. Par exemple, la participation à la prise de décision de toutes les parties affectées causalement par la politique climatique d'un pays donné semblerait poser des difficultés pratiques insurmontables, mais il existe des moyens de leur donner une certaine influence malgré tout, *via* les négociations internationales ou par l'intégration de représentants des générations futures et des non-humains dans les parlements. La plupart des démocraties sont toutefois aujourd'hui très loin d'appliquer cet idéal du principe des affectés, qui remet assez fondamentalement en cause les institutions traditionnelles. Celles-ci sont en effet avant tout prévues pour la représentation des intérêts humains, à l'échelle nationale et dans le présent ou le futur proche.

Justice comme reconnaissance

La justice comme reconnaissance se concentre sur le respect et la valorisation des identités individuelles et collectives, notamment celles des groupes historiquement marginalisés ou discriminés. Elle répond au besoin des individus d'être reconnus dans leur **dignité**, leur culture, leur genre, leur orientation sexuelle ou toute autre caractéristique marquante de leur identité personnelle ou sociale. La justice comme reconnaissance va au-delà de la distribution des ressources ou des procédures équitables. Elle vise à lutter contre les formes d'invisibilisation et de dévalorisation sociale, souvent sources de souffrance et d'exclusion. La reconnaissance est souvent considérée comme un élément central pour le développement personnel et l'acceptation sociale. Cette forme de justice appelle ainsi à corriger les **inégalités symboliques** en donnant une place et une dignité égales à toutes les identités dans l'espace public et dans les considérations de justice.

Interactions entre les trois types de justice

Ces trois dimensions sont interdépendantes et forment ensemble une approche globale de la justice. Une distribution équitable (justice distributive) ne suffit pas si

les processus décisionnels sont perçus comme biaisés (justice procédurale) ou si certaines identités sont dévalorisées (justice comme reconnaissance). Par exemple, une politique de transition énergétique pourrait être équitable sur le plan distributif, mais malgré tout injuste au niveau procédural si elle est conçue et décidée de manière arbitraire et unilatérale, ou si certaines communautés affectées sont marginalisées et ne sont pas reconnues ni respectées dans leurs spécificités. En plus de l'injustice de la situation, cela peut créer des résistances et rendre la politique en question plus difficile à faire accepter socialement. La justice distributive répond aux disparités les plus inéquitables, la justice procédurale renforce la confiance dans les institutions, et la justice comme reconnaissance encourage l'inclusion et le respect mutuel. Chacune de ces dimensions permet de répondre à des besoins différents mais essentiels pour garantir une société juste et harmonieuse.

8.2 Justice climatique distributive

Le changement climatique, par sa nature globale et intergénérationnelle mais aussi en raison des conséquences qu'il va avoir sur les sociétés humaines et de l'ampleur de la tâche à accomplir pour mettre fin aux émissions de GES, pose de nombreuses questions de justice distributive. Les questions d'équité sont d'ailleurs au cœur même des négociations internationales sur le climat puisqu'on peut lire à l'article 3 de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) (voir section 9.2) qu'il « incombe aux Parties de préserver le système climatique dans l'intérêt des générations présentes et futures, sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives² ».

Concernant le *périmètre* de la justice climatique, c'est donc en premier lieu entre *pays* que des questions d'équité se posent, et en particulier entre les pays à revenu élevé et les pays à faible revenu. De nombreux enjeux de justice sont toutefois également pertinents à l'échelle des *individus*, au sein d'un même pays ou de la population mondiale, étant donné les grandes inégalités observées en matière de contribution aux causes du problème et de risques d'en subir les conséquences. La dimension *inter-générationnelle* est bien sûr également très présente compte tenu de la temporalité longue, de l'ordre de plusieurs siècles voire de millénaires, des changements à l'œuvre³. Par ailleurs, si pendant longtemps les considérations de justice au sujet du changement climatique sont restées purement anthropocentrées⁴, c'est-à-dire ne s'intéressant qu'à la justice entre les humains, de récents développements tentent aujourd'hui d'élargir le débat à des considérations de justice vis-à-vis des *non-humains* et du reste de la nature, qui seront également impactés par les changements en cours⁵. Le périmètre de justice concerné par le changement climatique est donc très large et nécessite de sérier les problèmes ou de faire des choix méthodologiques (par exemple restreindre volontairement le périmètre) pour pouvoir les analyser.

Les *métriques* possibles, c'est-à-dire les éléments concrets qui posent des questions de justice distributive dans le cas du changement climatique (c'est-à-dire les

choses à distribuer), sont également nombreuses. Comme le montre la figure 8.1, des questions de répartition équitable peuvent intervenir en ce qui concerne les **dommages et bénéfices** du changement climatique, les **charges** notamment économiques qu'il occasionne, liées à la réduction des émissions, à l'adaptation aux conséquences inévitables, à la recherche et au développement des nouvelles technologies qui permettront d'atteindre ces objectifs, ainsi qu'à l'indemnisation des victimes du changement climatique pour les dommages qui n'auront pas pu être évités. Se posent également des questions importantes quant à la manière de répartir équitablement le **budget carbone restant** que l'humanité doit respecter pour maintenir la température globale en dessous d'un certain niveau de réchauffement. Dans la suite de cette section, nous développerons un peu plus en détail les trois éléments entourés en rouge dans la figure.

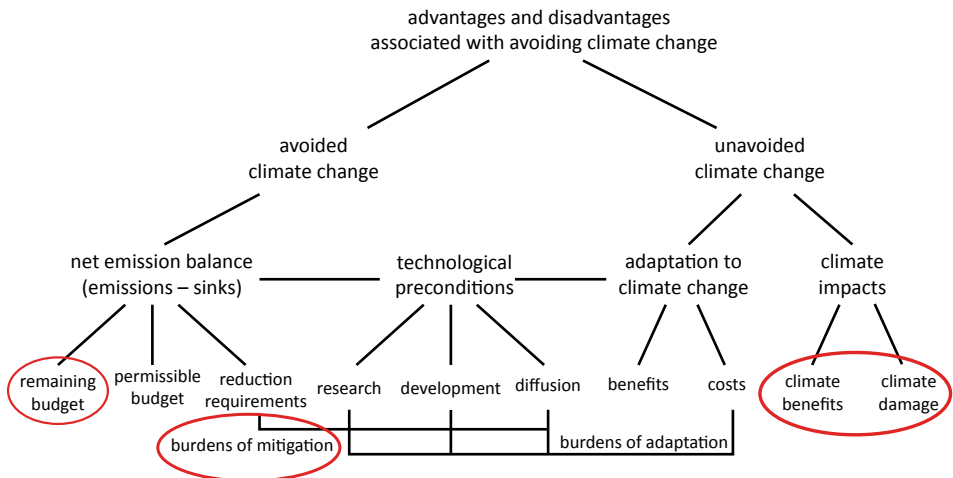


Fig. 8.1 Typologie des éléments de justice climatique distributive⁶.

Distribution asymétrique des risques et des causes du changement climatique

Nous avons vu dans la section 7.2 que les risques liés au changement climatique étaient distribués de manière très inégale parmi les populations de la planète et que les différences en matière de vulnérabilité étaient en grande partie le reflet des inégalités socio-économiques. Le changement climatique a donc pour effet le creusement des inégalités et l'aggravation des injustices préexistantes.

Cela s'explique notamment par le fait que la pauvreté et la vulnérabilité se renforcent mutuellement. Pour ne donner que quelques exemples, les 20 % les plus pauvres en termes de revenus sont deux fois plus susceptibles de vivre dans des logements fragiles que la moyenne, et le nombre de décès dus aux inondations est

sept fois plus élevé dans les pays les plus inégaux que dans les pays plus égalitaires⁷. Les populations pauvres dépendent aussi dans une large mesure des revenus agricoles et des services écosystémiques pour leurs moyens de subsistance et sont donc plus exposées aux impacts du changement climatique sur ces ressources. De plus, elles consacrent une part beaucoup plus importante de leur revenu à l'alimentation et à d'autres produits de première nécessité et sont donc plus vulnérables à l'augmentation des prix de ces denrées qui ferait suite à des événements météorologiques extrêmes. Une étude rapportée par le *Climate Inequality Report 2023* estime que les pertes relatives de revenu des 40 % les plus pauvres sont 70 % plus élevées que celles de la population moyenne⁸. Une autre étude a montré que l'Asie du Sud pourrait subir des pertes supplémentaires équivalant à 10-18 % du produit intérieur brut (PIB) de la région d'ici 2050 en raison de sa vulnérabilité aux impacts climatiques, ce qui est environ dix fois plus que la perte de PIB estimée pour l'Europe⁹.

Cette situation est d'autant plus injuste que les mêmes inégalités socio-économiques qui sont responsables d'un risque climatique plus élevé parmi les populations pauvres, notamment dans les pays à faible revenu, sont également responsables de fortes inégalités de contribution aux causes du problème.

En effet, plusieurs analyses ont montré qu'il existe dans l'ensemble une relation directe entre le niveau de revenu des individus et leurs émissions de GES, ce qui est logique puisqu'un revenu plus élevé permet de soutenir un mode de vie à niveau de consommation matérielle et énergétique plus élevé également. Il y a ainsi de très grandes inégalités en matière d'émissions de GES, que ce soit *entre individus*, quel que soit leur pays de résidence, et *entre les pays* industrialisés et les pays les plus pauvres de la planète. Ces inégalités peuvent être analysées de manière *ponctuelle* par rapport aux émissions d'une année donnée, ou de manière *historique* en prenant en compte le total de tous les GES qui ont été injectés dans l'atmosphère depuis le début de l'exploitation intensive des énergies fossiles.

La figure 8.2, issue d'un rapport de l'ONG Oxfam¹⁰, montre que les 10 % de la population mondiale ayant les revenus les plus élevés sont responsables de la moitié des émissions de CO₂ de l'année 2019, contre seulement 8 % des émissions pour les 50 % de la population ayant les plus bas revenus. Les super riches (le top 1 %) sont pour leur part responsables de 16 % des émissions mondiales, soit l'équivalent de ce qui a été émis par les 66 % les plus pauvres durant la même année¹¹. Ces chiffres restent à peu de chose près les mêmes lorsque l'on prend en compte l'ensemble des émissions produites sur la période 1990-2019.

Ces émissions sont comptabilisées selon la *méthode fondée sur la consommation*, qui prend en compte non seulement les émissions directes, mais également celles qui ont été nécessaires à la production des biens et services consommés par les individus, même si celle-ci a eu lieu dans un autre pays que le lieu de consommation. En d'autres termes, cette méthode ajuste les émissions de CO₂ en fonction des échanges commerciaux (importations et exportations) entre les différents pays.

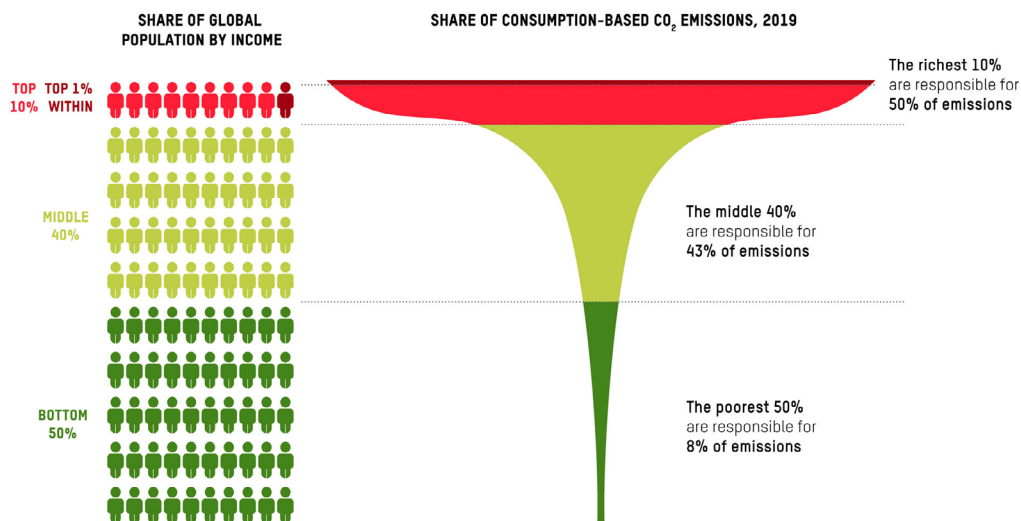


Fig. 8.2 Distribution des émissions de CO₂ en fonction du revenu¹².

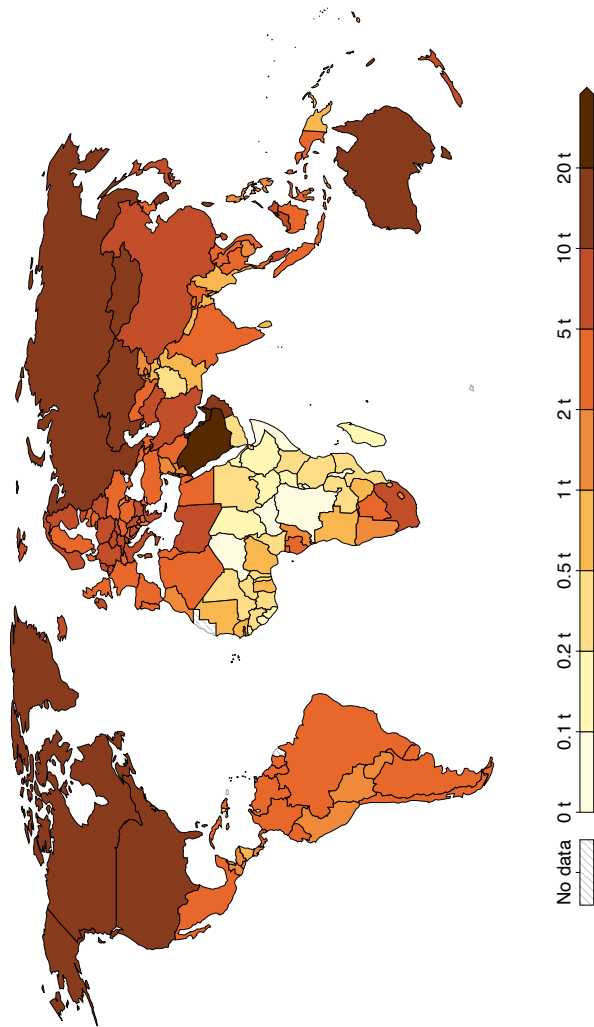
Le World Inequality Report¹³ arrive à des résultats similaires, avec des inégalités en fonction des classes de revenu sur tous les continents. En Europe, les individus appartenant au 10 % des revenus les plus élevés émettent en moyenne 29 tonnes de CO₂ équivalent en 2019, contre seulement 5 pour les 50 % de la population aux revenus les plus bas. Ces écarts sont encore plus prononcés en Amérique du Nord et en Asie de l'Est.

La situation n'est pas différente lorsque l'on compare non pas les individus, mais les pays entre eux. Selon le rapport Oxfam : « En 2019, les pays à revenu élevé, représentant 16 % de la population mondiale, étaient responsables de 40 % des émissions mondiales de CO₂ liées à la consommation, tandis que la contribution des pays à faible revenu était négligeable (0,4 %). Les émissions actuelles de l'Afrique basées sur la consommation sont inférieures à 4 % du total mondial, bien que le continent abrite 17 % de la population mondiale¹⁴. »

La figure 8.3 montre les émissions de CO₂ moyennes par personne pour l'année 2023, calculées cette fois-ci selon la *méthode fondée sur la production*, ne prenant en compte que les émissions directement produites sur le territoire des différents pays (et non les émissions liées aux biens et services importés). On y voit que les pays industrialisés et les pays producteurs de pétrole ont des émissions par personne bien plus élevées que les pays d'Afrique, d'Amérique du Sud ou d'Océanie. Cette carte contraste fortement avec celle du risque climatique (figure 7.8) présentée dans la section 7.2 qui montre que ce sont également ces dernières régions qui sont le plus à risque.

Per capita CO₂ emissions, 2023

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry¹. Land-use change is not included.

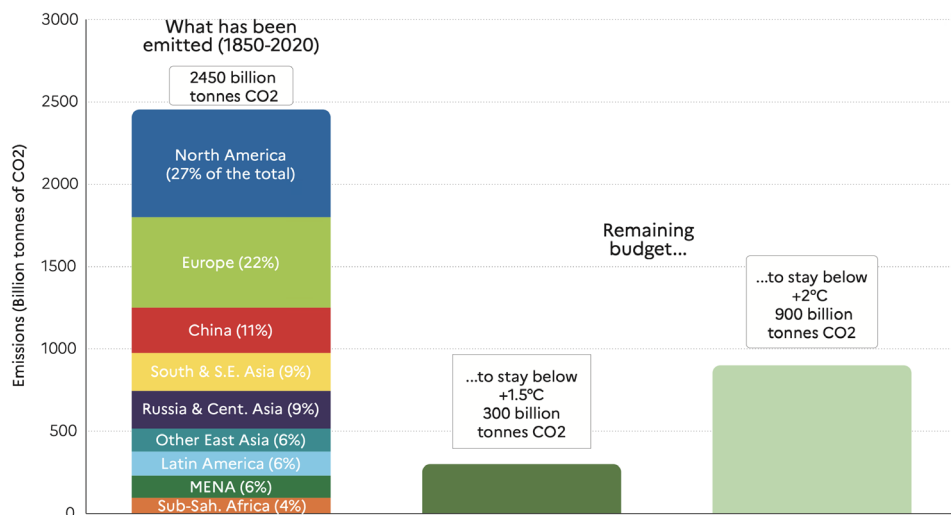


Data source: Global Carbon Budget (2024); Population based on various sources (2024)
OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

1. **Fossil emissions** Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO₂) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO₂ includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Fig. 8.3 Émissions de CO₂ territoriales par personne¹⁵.

Si l'on s'intéresse maintenant à la responsabilité historique des différentes régions de la planète (fondée sur la consommation), cette figure tirée du World Inequality Report 2022 montre que près de la moitié du total des émissions sur la période 1850-2020 est due à l'Amérique du Nord et à l'Europe. Malgré le rattrapage relativement rapide des pays nouvellement industrialisés, notamment la Chine, les pays occidentaux restent donc pour l'instant encore très largement responsables de la plus grande partie des causes du changement climatique.¹⁶



NOTE : Le graphique montre les émissions historiques par région (barre de gauche) et le budget carbone mondial restant (barres du centre et de droite) pour avoir 83 % de chances de rester sous 1,5 °C et 2 °C, selon le sixième rapport d'évaluation du Giec (2021). Le calcul des émissions régionales exclut le carbone incorporé dans les importations de biens et services provenant d'autres régions.

Fig. 8.4 Émissions historiques de CO₂ par région¹⁷.

Il y a donc une asymétrie très nette entre d'une part les populations les plus aisées (que l'analyse soit portée au niveau des individus ou des pays) qui ont largement contribué aux causes du problème mais sont le plus souvent moins exposées et moins vulnérables à ses conséquences, et d'autre part les personnes à bas revenus dont la contribution est pratiquement négligeable, mais qui vont subir de manière disproportionnée les impacts du changement climatique. Il s'agit là d'une situation d'injustice criante qui se fonde sur des inégalités socio-économiques passées et n'a pas encore reçu de reconnaissance officielle à la hauteur des enjeux dans les négociations internationales sur le changement climatique.

Juste distribution du budget carbone restant

Face à ce constat se pose donc la question de la juste distribution du budget carbone restant. Pour rappel, le **budget carbone total** désigne la quantité cumulée maximale

de CO₂ qui peut être relâchée dans l'atmosphère (depuis 1850) afin de limiter l'augmentation de la température globale à un niveau donné, avec une certaine probabilité (voir section 2.2). Une grande partie du budget carbone *total* ayant déjà été consommée, le ***budget carbone restant*** désigne la quantité d'émissions disponibles à partir d'une date donnée. Ainsi, le budget restant pour limiter le réchauffement à 1,5 °C avec une probabilité de 67 % était de 400 Gt CO₂ en 2020, soit l'équivalent d'environ dix ans d'émission à émissions constantes¹⁸. Qui a droit à l'utilisation de l'énergie fossile correspondant à ce budget restant ? Il s'agit là d'une question typique de justice distributive. De nombreux principes de justice (ou d'allocation) ont été proposés pour répartir le budget carbone restant de manière équitable entre les différents pays de la planète. Les principes les plus courants sont les principes fondés sur l'égalité, la responsabilité et la capacité à agir des nations.

Le principe de l'***égalité*** propose une répartition égalitaire du budget carbone restant parmi la population mondiale sur la base de l'idée d'un droit égal à satisfaire ses besoins énergétiques. Selon cette logique chaque pays reçoit donc une part du budget proportionnelle à sa population. La difficulté est toutefois que ce principe ne tient pas compte des émissions passées, alors que celles-ci ont largement contribué au développement industriel des pays à revenu élevé et à leur niveau de vie actuel. Il est aussi difficilement compatible avec un droit des générations futures à utiliser une partie de ce budget carbone, ce qui pourrait diminuer drastiquement le budget de la génération actuelle. Il semble donc intuitivement plus équitable de s'écarter de l'égalité stricte et de réserver une plus grande part du budget carbone restant aux pays qui doivent encore sortir une partie de leur population de la pauvreté à court terme, tout en assurant une transition vers des énergies décarbonées pour le futur.

Ce principe de ***priorité aux personnes les plus défavorisées***, aussi parfois nommé droit au développement, semble d'ailleurs réaliste au regard des chiffres puisque selon certaines estimations le budget carbone nécessaire pour éradiquer la pauvreté mondiale en dessous de la ligne des 5,50 dollars/jour (ce qui concerne 3 milliards de personnes) augmenterait les émissions mondiales de 18 %, soit à peine plus que les émissions actuelles du 1 % supérieur des revenus et environ un tiers des émissions du 10 % supérieur¹⁹ (figure 8.2). Une réduction raisonnable des émissions des riches et super riches de la planète permettrait donc de libérer une part suffisante du budget carbone restant pour extraire de l'extrême pauvreté près de la moitié de la population mondiale, et ce avec les technologies actuelles, dont on peut d'ailleurs imaginer qu'elles deviendront de plus en plus sobres en carbone à l'avenir. Ce principe est cohérent avec une distinction importante proposée par le philosophe Henry Shue au début des années 1990 entre ***émissions de subsistance*** et ***émissions de luxe***, le point central étant comme il l'écrit lui-même qu'il ne serait « pas équitable de demander à certaines personnes de renoncer à des biens de première nécessité pour que d'autres puissent conserver des biens de luxe²⁰ ». Une autre façon d'interpréter cette intuition est de recourir au ***principe de suffisance***, qui pose que la distribution du budget carbone n'est juste que si chaque personne se voit attribuer une part suffisante pour lui permettre de vivre une vie digne. Il s'agit

ici d'une exigence minimale de justice qui doit permettre de s'assurer que les émissions de GES serviront en priorité à assouvir les besoins fondamentaux. Ce principe laisse toutefois sans réponse la question de savoir comment il convient de distribuer la part restante du budget, une fois les besoins fondamentaux assurés. Il est par ailleurs plausible que le budget carbone restant ne suffise pas à assurer même les besoins fondamentaux de toutes et tous à long terme. Cela implique donc une obligation de justice de décarboner le système énergétique mondial afin de permettre aux générations futures de satisfaire leurs besoins sans déstabiliser le climat.

Le principe fondé sur la **responsabilité** prend en compte les contributions historiques des pays au réchauffement climatique. La part du budget carbone restant qui sera attribuée à un pays dépendra donc de ses émissions passées, et éventuellement de l'évolution de sa population. Selon cette dernière approche, le principe de responsabilité peut être interprété comme un partage égalitaire (c'est-à-dire proportionnel à la population) du budget carbone *total* (donc depuis 1850) entre les pays. Ce principe semble *a priori* plus équitable qu'une distribution purement égalitaire du budget carbone *restant* puisqu'il prend en compte les émissions historiques. Il est de plus cohérent avec le principe de priorité aux personnes les plus défavorisées puisque les pays à faible revenu, qui ont peu émis jusqu'ici, auraient droit à une plus grande part du budget restant. Ce principe pose en revanche un certain nombre de difficultés pratiques. En effet, les pays à revenu élevé ayant émis bien plus que leur juste part du budget carbone total par le passé, certains d'entre eux, si ce n'est tous, n'auront droit à aucune part du budget carbone restant et seront au contraire en situation de dette carbone. Or, il est impensable que les pays industrialisés cessent immédiatement d'émettre du CO₂ puisque la décarbonation d'une économie prend du temps. Les pays à revenu élevé vont donc inmanquablement consommer une partie du budget carbone restant, malgré le fait que cela se fera au détriment de la juste part des pays à faible et moyen revenu. Si l'on s'en tient à ce principe, la dette carbone accumulée par les pays à revenu élevé devra être repayée d'une part en aidant les pays à faible et moyen revenu à financer leur développement à l'aide de technologies propres, et d'autre part en investissant dans des technologies de recapture du CO₂ atmosphérique afin de « rembourser » leur dette carbone.

Enfin, le principe de la **capacité** fait référence à la capacité des pays à financer et mettre en œuvre la décarbonation de leur économie et de leur système énergétique. Celle-ci varie en effet substantiellement selon les ressources économiques, l'expertise technique et les contextes institutionnels, souvent liés au degré d'industrialisation. Selon ce principe, les pays les plus avancés auront une part plus petite du budget carbone restant puisqu'ils sont plus à même de réduire leurs émissions de GES rapidement. La difficulté tient toutefois à nouveau au fait que les pays industrialisés sont souvent de gros émetteurs en raison de leur mode de vie très énergivore, et ont donc plus de chemin à parcourir pour réduire leurs émissions à un niveau compatible avec les objectifs de limitation de la température. Ce principe est donc souvent considéré non pas tout seul mais comme un complément à d'autres principes, comme nous allons le voir dans la section suivante.

Malgré des discussions nourries dans la littérature et dans le débat public sur ces différents principes d'allocation, la réalité sur le terrain est malheureusement bien différente. Bien que l'accord de Paris fixe un objectif concret de limitation du réchauffement (nettement en dessous de + 2 °C et si possible de 1,5 °C ; voir section 9.2), il n'y a que peu de références au budget carbone restant dans les négociations internationales. Les principes qui y sont appliqués de manière informelle sont plus proches du principe dit de *grandfathering*, ou principe des droits acquis²¹. Ce principe repose sur l'idée que le niveau d'émissions toléré pour chaque pays reflète son niveau d'émissions passé (comme un droit acquis par la pratique), sans être contraint par une norme externe telle que le budget carbone restant. C'était le cas dans le cadre du protocole de Kyoto, le traité qui a précédé l'accord de Paris, qui assignait aux pays à revenu élevé des objectifs de réduction de leurs émissions similaires, exprimés en pourcentage de leur niveau d'émissions du moment. L'accord de Paris constitue une légère amélioration à cet égard, puisque de nombreux pays tentent de suivre, à partir de leurs émissions actuelles, une pente de réduction qui leur permettra d'atteindre zéro émissions nettes en 2050. Plusieurs analyses ont toutefois montré que même si ces promesses étaient tenues, les émissions engendrées dépasseraient grandement le budget carbone restant pour respecter l'objectif des 1,5 °C (voir section 9.3)²². Le principe du *grandfathering* est largement considéré comme très problématique du point de vue de la justice, puisqu'il récompense les grands émetteurs en leur permettant de continuer à émettre des quantités plus élevées que les autres. Il a été adopté par défaut à l'échelle internationale pour des raisons pragmatiques face au refus des grands émetteurs, qui sont souvent aussi les pays les plus puissants, de décarboner rapidement leur économie.

L'existence du budget carbone signifie qu'en fin de compte, les émissions mondiales devront être réduites à zéro à l'exception d'un petit solde résiduel qui pourra être récupéré de l'atmosphère par des moyens techniques, raison pour laquelle on parle souvent de zéro émissions *nettes* (voir encadré 9.1). Les considérations de justice climatique doivent donc tenir compte du fait qu'en plus d'une répartition juste du budget carbone restant, quelle qu'elle soit, les émissions de toutes les parties devront converger vers zéro à un moment donné, en général fixé à 2050. Cela nous amène donc à la question de savoir qui doit prendre en charge les coûts des politiques de transition énergétique pour atteindre cet objectif.

Juste distribution des coûts des politiques climatiques

Au-delà de la répartition du budget carbone restant, une autre question pressante de justice climatique distributive est donc celle de la répartition des coûts des politiques d'**atténuation**, à savoir la réduction des émissions de GES et la récupération du CO₂ déjà présent dans l'atmosphère (aussi nommées « émissions négatives » – voir section 9.3). Ces coûts incluent entre autres les investissements de développement, de diffusion et de mise en œuvre des technologies énergétiques non carbonées, des solutions de réduction de la consommation énergétique (comme l'isolation des bâtiments) et des techniques d'émissions négatives permettant la capture et le

stockage permanent du CO₂ atmosphérique (par exemple *via* la plantation d'arbres ou des technologies de filtrage de l'air). Les considérations de justice distributive décrites ici s'appliquent également en partie aux coûts des mesures d'**adaptation** aux impacts du changement climatique qui ne pourront pas être évités, telles que la construction de digues, le réaménagement des cours d'eau pour éviter les inondations ou le verdissement des villes pour éviter les îlots de chaleur. La question des coûts comprend par ailleurs également la réparation des **dommages** causés par le changement climatique et l'**indemnisation** des victimes, bien que ces deux dernières catégories appartiennent plutôt au domaine de la justice dite « corrective » qu'à des enjeux de justice distributive à proprement parler.

Tout comme la question du budget carbone restant, les débats concernant l'équité du partage des coûts se fondent en premier lieu sur les principes de responsabilité et de capacité, l'égalité étant rarement évoquée car jugée trop inéquitable au regard des grandes différences entre les pays.

Le premier principe est celui du **pollueur-payeur** qui soutient que les pays qui ont le plus contribué au problème sont ceux qui devraient supporter les charges les plus lourdes pour le résoudre. Les coûts des politiques climatiques sont donc, dans ce cas, distribués proportionnellement aux émissions de GES historiques des pays. Ce principe est déjà inscrit dans le droit environnemental international et bénéficie donc d'une forte légitimité, à la fois sur le plan moral et sur le plan juridique. Il fait toutefois face à deux problèmes principaux²³. Le premier est le problème des *émissions produites par les générations passées* et dont les personnes responsables sont aujourd'hui décédées. En dérivant la responsabilité morale pour les dommages causés par le changement climatique de la responsabilité causale, c'est-à-dire des émissions de GES elles-mêmes, le principe du pollueur-payeur ne permet pas d'attribuer à la génération présente les coûts liés aux actions des générations passées. Il semble en effet injuste de faire payer les individus des générations présentes pour des actions passées qu'ils n'ont ni choisies ni acceptées. Le second problème est celui de l'*ignorance excusable*. Les conséquences de l'exploitation massive des énergies fossiles étaient méconnues du public durant la plus grande partie du XX^e siècle et dans une large mesure des décideuses et décideurs politiques et économiques eux-mêmes, même si des scientifiques ont estimé les émissions de CO₂ provenant de la combustion de charbon dès 1855 au moins, et l'impact possible de ces émissions sur le climat dès 1896²⁴. Peut-on donc légitimement rendre ces générations responsables pour une situation qu'elles n'auraient pas pu prévoir ? La date de 1990, correspondant à la publication du premier rapport du Giec, est souvent mentionnée dans la littérature comme celle à partir de laquelle toute ignorance du problème ne serait plus excusable. Le principe du pollueur-payeur ne fonctionne donc bien que pour les émissions produites après cette date, mais il semble inopérant pour les émissions historiques.

Pour pallier ce problème, il est parfois suggéré de mobiliser un autre principe, celui du **bénéficiaire-payeur**. Selon ce principe les coûts des politiques climatiques doivent être supportés proportionnellement aux avantages tirés des politiques d'industrialisation et d'exploitation des énergies fossiles. Or, ce sont bien sûr les

générations actuelles des pays à revenu élevé qui en sont les bénéficiaires principaux, puisqu'elles doivent à ces politiques d'industrialisation leur niveau de vie actuel. La logique qui sous-tend ce principe est que les générations actuelles des pays à revenu élevé bénéficient d'une situation acquise de manière injuste aux dépens du système climatique et des populations qui en subissent les conséquences²⁵. De ce point de vue, il serait donc équitable qu'elles endossent la plus grande partie des coûts de résolution du problème. Cependant, comme pour le principe du pollueur-payeur, une difficulté du principe du bénéficiaire-payeur tient au fait que les générations actuelles ont hérité de leur mode de vie sans avoir pu y consentir. Selon cet argument, elles n'ont eu aucun rôle à jouer dans les décisions de politiques industrielles passées et ne peuvent donc pas être tenues responsables des injustices passées, malgré les avantages dont elles jouissent aujourd'hui. En réponse à cela, il peut être utile de distinguer la responsabilité morale (en d'autres termes la culpabilité) de la responsabilité financière, c'est-à-dire le devoir de prendre en charge les coûts du problème. Les générations actuelles ne seraient donc pas coupables des dommages causés par les émissions historiques, mais elles sont responsables d'en assumer les frais. Les dettes, tout comme les bénéfices, peuvent en effet être héritées d'une génération à l'autre.

Les deux principes abordés jusqu'ici se fondent sur la notion de responsabilité. Le principe de la **capacité à payer** s'inscrit plutôt dans une optique de solidarité. Il suggère que les coûts des politiques climatiques doivent être pris en charge de manière proportionnelle à la capacité économique des agents. Cela correspond à une pratique courante dans le financement des organisations internationales et peut être justifié par le fait que le coût relatif de financement des politiques climatiques, et donc le sacrifice consenti, est bien plus faible pour les pays à revenu élevé que pour les pays à faible et moyen revenu. Compte tenu de l'importance des risques que le changement climatique impose à la population mondiale, en particulier aux populations les plus défavorisées, et des dépenses raisonnables que cela supposerait de la part des pays à revenu élevé, une partie de la communauté scientifique suggère même que les contributions ne devraient pas être proportionnelles à la capacité économique, mais calculées de manière progressive (à l'image de la fiscalité selon la capacité contributive). Plus le PIB d'un État est élevé, plus la part de son PIB qu'il devrait consacrer à la lutte contre le changement climatique devrait être grande²⁶. Une faiblesse de ce principe est toutefois son lien très indirect avec la notion de responsabilité, ce qui est quelque peu contre-intuitif puisque certains États devront payer pour des dommages dont ils ne sont pas responsables. Il est toutefois soutenu par l'idée d'un devoir de solidarité face à un problème collectif, à l'image de l'aide humanitaire, ou par des considérations purement pragmatiques puisqu'il constitue un moyen de faire avancer la lutte contre le changement climatique et d'éviter une catastrophe écologique mondiale. Le principe de la capacité à payer est en général mobilisé dans la littérature comme un complément aux autres principes, par exemple pour distribuer les charges résultant des émissions historiques, qui ne peuvent pas être couvertes par le principe du pollueur-payeur.

Ces différents principes, bien que répondant à des logiques différentes, peuvent donc être combinés pour déterminer précisément la juste contribution de chaque pays²⁷. De manière générale, l'important tient cependant au fait que les trois principes convergent vers une même conclusion²⁸. Ce sont les pays à revenu élevé, qui sont les plus grands émetteurs historiques mais aussi les États les plus riches de la planète, qui doivent prendre en charge la plus grande partie des coûts du changement climatique, cela afin de financer leurs propres politiques d'atténuation et d'adaptation, mais aussi d'aider les pays à faible et moyen revenu à financer les leurs. Dans les négociations internationales, cela s'est concrétisé par la mise en place de fonds de soutien internationaux, comme le Fonds vert pour le climat, le Fonds d'adaptation et le Fonds pour les pays les moins avancés, qui visent à aider les pays les plus pauvres à s'adapter aux effets du changement climatique et à développer des économies sobres en carbone. Financé par les pays riches, ce soutien comprend des subventions et des prêts pour des projets d'atténuation et d'adaptation. Toutefois, les montants promis sont souvent inférieurs aux besoins, les paiements, lents et les critères d'accès, complexes. La gouvernance peu transparente de ces fonds freine par ailleurs leur efficacité et continue à alimenter le mécontentement des pays bénéficiaires.

La notion de *pertes et préjudices* (*loss and damage* en anglais) désigne les dommages irréversibles causés par les effets du changement climatique, notamment dans les pays les plus vulnérables. Elle couvre les pertes économiques (récoltes, infrastructures) et non économiques (vies humaines, cultures, biodiversité). Ce concept est devenu une question de justice centrale dans les négociations climatiques internationales, car la compensation financière des dommages causés par les pays historiquement les plus émetteurs fait partie des revendications des pays à bas et moyens revenus depuis des décennies, alors que les pays à haut revenu ont jusqu'à récemment toujours refusé d'entrer en matière sur cette question.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une question de justice distributive au sens strict, mais plutôt d'une question de justice corrective, les principaux enjeux tournent également autour du financement : qui doit payer, combien, et comment ? Les pays du Sud demandent un fonds dédié, tandis que les pays du Nord redoutent des implications juridiques ou des demandes de compensation excessives. En 2022, la COP27 a marqué un tournant en actant la création d'un fonds sur les pertes et préjudices, bien que ses modalités de fonctionnement et les montants à engager restent à définir. La question demeure politiquement sensible et techniquement complexe.

8.3 Justice procédurale dans la gouvernance du changement climatique

Comme cela a été expliqué dans la section 8.1, la justice procédurale se concentre sur les processus qui mènent aux décisions, en veillant à ce que toutes les parties prenantes aient des possibilités d'exprimer leur point de vue, de participer ou d'influencer les résultats du processus. Elle ne s'intéresse pas aux résultats, mais à la manière

dont ces résultats sont obtenus. Étant donné la nature mondiale et les enjeux multiples du problème, elle est essentielle dans la gouvernance mondiale du changement climatique, notamment lors des conférences des parties (COP) sous l'égide de la CCNUCC²⁹. Certains défis importants persistent dans le mode de fonctionnement actuel des négociations internationales sur le climat.

Inclusion et représentation : le changement climatique affecte de manière disproportionnée certains pays, notamment les petites nations insulaires (par exemple, les Maldives ou Tuvalu) ou les États africains. Cependant, ces parties prenantes ne sont souvent pas suffisamment représentées dans les principaux forums de prise de décision. Par exemple, alors que les négociations des Nations unies sur le climat visent à inclure toutes les nations sur un pied d'égalité, les disparités en matière d'expertise technique, de ressources financières et de capacité de négociation peuvent marginaliser les acteurs les moins puissants³⁰. Cette inégalité structurelle peut limiter leur influence sur les décisions, compromettant ainsi la justice procédurale. Ce déséquilibre nuit non seulement à l'équité, mais donne encore l'impression que le processus décisionnel favorise les pays les plus riches.

Règles de prise de décision à l'unanimité : la CCNUCC fonctionne selon un modèle fondé sur le consensus, où les décisions doivent souvent être prises à l'unanimité. Cette approche garantit théoriquement que toutes les voix sont entendues, mais elle confère aussi à tout pays le pouvoir de bloquer les progrès, même lorsque la majorité s'accorde sur l'urgence d'une action. Cela favorise parfois les intérêts nationaux au détriment de l'intérêt global. Si cette règle peut permettre à certains États vulnérables et moins influents d'imposer des mesures plus ambitieuses, elle tend généralement à favoriser le *statu quo*, à diluer l'ambition des accords et à ralentir les progrès. Les compromis nécessaires pour satisfaire toutes les parties prenantes conduisent souvent à des engagements minimaux, insuffisants pour limiter le réchauffement à 1,5 °C.

Exclusion des acteurs non étatiques : les communautés qui sont en première ligne face au changement climatique, telles que les villes, les communautés locales (notamment les populations indigènes) ou les mouvements associatifs, sont souvent exclues des négociations officielles. S'il existe quelques possibilités de participation en tant qu'observatrices et observateurs, elles sont limitées et largement symboliques, ce qui réduit l'influence de celles et ceux qui subissent directement les effets du changement climatique et possèdent des connaissances locales précieuses. Cette exclusion risque d'aboutir à des solutions qui ne répondent pas aux besoins des plus vulnérables.

Transparence et responsabilité : la prise de décision dans la gouvernance climatique est souvent opaque, les négociations très techniques et les accords en coulisses sont souvent inaccessibles au grand public et aux parties prenantes. Ce manque de transparence érode la confiance et la légitimité des processus, ce qui rend plus difficile la mobilisation de l'action collective.

Ces défis de justice procédurale exacerbent les inégalités dans les négociations climatiques. Les pays et les groupes les moins responsables des émissions de GES subissent les impacts les plus importants tout en ayant le moins d'influence sur les décisions relatives au climat. Cela alimente une perception d'injustice, affaiblit la coopération internationale et freine les actions climatiques ambitieuses. Pour remédier à ces problèmes, certaines réformes ont été proposées comme l'adoption de **majorités qualifiées** ou de mécanismes différenciés, où les voix des pays les plus affectés auraient un poids particulier³¹. Une transparence accrue et un renforcement des capacités des États les moins favorisés pourraient aussi contribuer à une meilleure justice procédurale dans les négociations.

8.4 Justice comme reconnaissance dans les politiques climatiques

La justice comme reconnaissance fait de plus en plus parler d'elle dans le cadre des débats sur le changement climatique et des réponses à y apporter. Cela est dû en grande partie à la mise en lumière par le dernier rapport du Giec, mais également par le travail des ONG, d'inégalités systémiques dans la manière dont certains groupes, comme les communautés autochtones, les femmes, les jeunes et d'autres groupes minoritaires sont ignorés ou marginalisés dans l'élaboration des politiques publiques. Cela passe notamment par l'**invisibilisation des intérêts spécifiques** de ces groupes lors des négociations climatiques, tel que cela a déjà été évoqué dans la section précédente. Par exemple, les peuples autochtones d'Amazonie sont souvent exclus des discussions politiques et des projets de conservation, malgré leur rôle essentiel dans la protection des forêts tropicales, qui sont des puits de carbone critiques pour la planète³².

Mais au-delà des processus de prise de position, les problématiques de justice comme reconnaissance se manifestent souvent par l'imposition de **solutions d'atténuation ou d'adaptation inadaptées**. Certaines solutions, bien qu'ambitieuses sur le papier, peuvent causer des injustices sur le terrain lorsqu'elles ne tiennent pas compte des contextes locaux et des besoins des communautés. Par exemple, les projets de compensation carbone, tels que la création de vastes plantations d'arbres dans des régions tropicales, peuvent conduire à l'appropriation de terres. Ces initiatives, souvent portées par des entreprises ou des gouvernements étrangers, déplacent parfois des populations locales ou limitent leur accès aux ressources naturelles dont elles dépendent, comme l'eau ou les terres agricoles³³. Dans certains pays africains, comme la RDC, des projets REDD+ (réduction des émissions de GES dues à la déforestation et à la dégradation des forêts) visant à ralentir la déforestation ont été critiqués pour avoir limité l'accès des populations locales aux forêts, une ressource vitale pour leur subsistance. Bien que ces projets visent à réduire les émissions de carbone, leur mise en œuvre a parfois été faite sans consultation des communautés locales, entraînant des tensions et des injustices³⁴. Dans le même ordre d'idée, les grands barrages hydroélectriques ou les projets de production d'énergie renouvelable, bien

que climatiquement bénéfiques en théorie, peuvent détruire des écosystèmes locaux ou déposséder des communautés autochtones de leurs territoires ancestraux³⁵. Ces solutions *top-down*, imposées sans consultation adéquate, alimentent un sentiment d'injustice, accentuent les inégalités sociales et mènent souvent à des situations de maladaptation (voir section 7.2).

Les populations autochtones et locales possèdent par ailleurs des **savoirs traditionnels** riches et adaptés à leurs écosystèmes, développés sur des générations. Ces connaissances peuvent jouer un rôle clé dans la lutte contre le changement climatique, notamment dans la gestion des forêts, la préservation de la biodiversité ou les techniques d'agriculture résiliente³⁶. Malheureusement, dans les forums internationaux et les politiques nationales, ces savoirs sont souvent marginalisés ou ignorés, les approches scientifiques et technocratiques étant privilégiées, ce qui constitue également une forme injuste de non-reconnaissance. Par exemple, les programmes de conservation de type « forteresse », qui interdisent toute intervention humaine dans certaines zones naturelles, rejettent l'idée que les peuples autochtones peuvent gérer durablement leurs territoires. Cela contribue à une hiérarchisation des connaissances où les approches occidentales dominent, dévalorisant les apports des cultures non occidentales.

9. Gouvernance mondiale et obstacles à l'action climatique

Dans la partie précédente, nous avons vu que le changement climatique posait de pressantes questions de justice qui ne peuvent être pleinement résolues qu'à l'échelle globale car elles demandent une coordination de tous les acteurs. Cette partie approfondit l'analyse de cette problématique, d'abord en analysant les particularités du changement climatique qui expliquent pourquoi une gouvernance du climat à l'échelle mondiale est nécessaire. Ensuite, après avoir détaillé le fonctionnement général de la gouvernance climatique mondiale, ses principales institutions et ses limites, certaines explications possibles de l'insuffisance actuelle des réponses politiques au problème sont proposées.

9.1 Pourquoi a-t-on besoin d'une gouvernance mondiale ?

La lutte contre le changement climatique à l'échelle mondiale est une tâche particulièrement complexe pour plusieurs raisons, qui touchent à des dimensions éthiques, politiques, économiques, sociales et technologiques. Elle demande donc une **coordination** de l'action entre tous les acteurs impliqués. Le problème ne peut en effet être résolu que si presque tout le monde y contribue, ou en tout cas une majorité significative d'acteurs. Du fait de la multiplicité des parties prenantes (des individus aux pays en passant par les villes, les entreprises, les régions, etc.) ayant des intérêts, des ressources et des capacités différentes, l'action climatique fait face aux difficultés typiques des **problèmes d'action collective**. L'une de ces difficultés est celle du « passager clandestin » qui incite certains pays ou certains acteurs à ne pas agir tout en bénéficiant des efforts effectués par d'autres pays. À cela s'ajoutent notamment le **caractère mondial** du problème, le fait que les impacts des émissions de GES ne s'arrêtent pas aux frontières des pays et son **caractère intergénérationnel** qui implique que la génération qui doit lutter contre le changement climatique n'est pas celle qui va en tirer les bénéfices principaux. Établir une gouvernance mondiale juste et jouissant d'un degré élevé de légitimité est donc indispensable pour assurer l'efficacité, l'équité et la pérennité de la lutte contre le changement climatique. Nous expliquons ici brièvement comment ces difficultés ont été théorisées, avant de décrire les institutions principales de la gouvernance mondiale du changement climatique.

La tragédie des communs

La **tragédie des communs** (*tragedy of the commons* en anglais) est une analyse popularisée par le biologiste Garrett Hardin en 1968¹, qui décrit une situation où

des ressources partagées, appelées « communs », sont surexploitées par des individus agissant selon leur intérêt personnel au détriment du bien collectif. Ce modèle illustre comment des comportements rationnels à l'échelle individuelle peuvent conduire, en l'absence de régulation, à l'épuisement ou à la dégradation de ressources naturelles ou collectives.

Les conditions nécessaires à ce qu'une telle « tragédie » se développe sont :

- une ressource qui est : *finie* (en quantité limitée), *rivale* (sa consommation pour les uns diminue sa disponibilité pour les autres) et en *libre accès* (tout le monde peut en consommer autant qu'il le désire) ;
- des acteurs rationnels et égoïstes : motivés uniquement par la *maximisation de leur propre bénéfice* (via l'exploitation de la ressource) ;
- l'absence de régulation : donc *aucune règle formelle ou informelle* de gestion collective

Si ces conditions sont réunies, chaque individu cherchant à maximiser ses bénéfices immédiats exploite davantage cette ressource sans tenir compte des coûts collectifs associés à son épuisement. Ces coûts sont partagés par l'ensemble de la communauté, tandis que les gains sont directement perçus par celles et ceux qui l'exploitent. L'exemple classique utilisé par Hardin est celui d'un pâturage partagé par plusieurs propriétaires de bétail en l'absence de règles de gestion collective². Chaque propriétaire a intérêt à ajouter plus de bétail pour augmenter ses profits, mais si tous adoptent cette stratégie, le pâturage est surchargé, l'herbe ne pousse plus et la ressource finit par être détruite, privant tous les propriétaires de leur moyen de subsistance.

La tragédie des communs repose donc sur un dilemme d'action collective. Les choix individuels rationnels, dictés par l'intérêt personnel, entrent en conflit avec l'intérêt collectif. L'intérêt de cette analyse est de montrer qu'alors même qu'il est dans l'intérêt à long terme de chaque acteur d'éviter l'épuisement de la ressource, la logique des choix rationnels individuels dirige le collectif vers la tragédie. On pourrait en effet s'attendre à ce qu'une fois que le risque d'épuisement de la ressource est connu, les acteurs modèrent volontairement leur usage afin de la préserver. Malheureusement, l'intérêt d'un acteur individuel à continuer son exploitation reste prépondérant, quelle que soit son hypothèse au sujet de la manière dont les autres vont se comporter. S'il fait l'hypothèse que les autres vont continuer à exploiter la ressource, alors il a intérêt à maximiser également son exploitation avant qu'elle ne s'épuise. S'il fait au contraire l'hypothèse que les autres vont limiter leur usage pour préserver la ressource, il a ici encore intérêt à l'exploiter au maximum puisque la pérennité de la ressource est assurée. Il s'agit là d'un comportement de *passager clandestin*, par lequel une personne profite de l'action des autres membres du collectif sans y participer elle-même. L'absence de régulation ou de coordination aggrave cette dynamique, car chaque personne utilisant la ressource anticipe que les autres ne limiteront pas non plus leur usage. Ainsi, le bénéfice immédiat de l'exploitation est perçu comme supérieur au risque collectif d'épuisement de la ressource.

Ce modèle peut être appliqué à la problématique du changement climatique. Ici, l'atmosphère et le climat mondial sont des ressources communes. Les émissions de GES, issues de l'industrie, du transport ou de l'agriculture, contribuent à la dégradation de cette ressource partagée. L'atmosphère agit comme un puits pouvant absorber une quantité limitée de GES sans altérer le climat de manière démesurément dangereuse (voir section 2.2). Cependant, chaque pays, entreprise ou individu tire un bénéfice économique direct des activités émettrices, tout en diffusant les impacts négatifs – comme le réchauffement global ou les événements météorologiques extrêmes – à l'ensemble de la planète. Le conflit entre intérêt individuel et collectif est évident : réduire les émissions implique des coûts économiques à court terme pour les acteurs qui le font, alors que les bénéfices, en matière de stabilisation climatique, sont collectifs et à long terme. De plus, l'absence de régulation mondiale contraignante rend difficile une gestion équitable de cette ressource.

Ainsi, la tragédie des communs illustre les défis complexes de la gestion des ressources partagées. Dans le contexte du changement climatique, elle met en évidence la nécessité de dépasser les intérêts individuels (des individus, entreprises, pays, etc.) pour privilégier des solutions collectives et durables. Elle montre donc la nécessité de mettre en place une gouvernance mondiale efficace, des mécanismes incitatifs et une coopération accrue entre les parties prenantes. Les régulations collectives, comme l'instauration de quotas d'émissions ou de taxes carbone, permettent l'internalisation des coûts et de s'assurer que tous les acteurs contribuent à l'effort collectif, contournant ainsi la logique de la tragédie des communs en évitant le phénomène du passager clandestin. Les mécanismes internationaux actuels, comme l'accord de Paris, sont des débuts de réponse à ce problème, mais ils reposent encore principalement sur des engagements volontaires, ce qui limite leur efficacité.

La tyrannie du présent

L'analyse de la problématique du changement climatique en matière de tragédie des communs est cependant insuffisante car elle ne prend pas en compte l'aspect intergénérationnel du problème, qui est également un facteur explicatif de la difficulté à agir à la hauteur du défi.

La **tyrannie du présent** est un concept développé par le philosophe Stephen Gardiner³, qui met en lumière une dimension clé du défi éthique posé par le changement climatique : le pouvoir disproportionné exercé par la génération actuelle sur l'avenir de la planète. Gardiner définit cela comme une forme d'injustice intergénérationnelle où les générations présentes profitent des activités qui détériorent l'environnement, tandis que les coûts – tels que les impacts climatiques graves – sont reportés sur les générations futures, qui n'ont aucun moyen de se faire entendre dans les décisions actuelles.

Au cœur de cette tyrannie se trouve une **fragmentation temporelle de l'action**. Les générations actuelles prennent des décisions basées sur leurs intérêts immédiats, comme la croissance économique et le confort matériel, plutôt que sur la santé à long terme de la planète et la stabilité climatique. Cette dynamique est

aggravée par la nature même du changement climatique : les émissions de GES ont des impacts à très long terme, le dioxyde de carbone restant dans l'atmosphère pendant des siècles, voire des millénaires. Ce décalage temporel entre les causes et les effets du changement climatique rend plus facile pour la génération actuelle d'ignorer ses responsabilités.

Gardiner soutient que la tyrannie du présent constitue un défi éthique encore plus profond que la tragédie des communs, notamment du fait qu'il n'existe pas de solution coopérative dans ce cas, en raison de l'absence de réciprocité entre les générations. Alors que cette dernière se concentre sur la surexploitation des ressources partagées par des acteurs contemporains, la tyrannie du présent implique un transfert continu des coûts d'une génération à l'autre. Cette dimension intergénérationnelle transforme le problème éthique : chaque génération successive est tentée de privilégier ses bénéfices à court terme au détriment des responsabilités à long terme. Gardiner souligne que l'inaction de la génération actuelle non seulement aggrave le problème, mais rend également plus difficile pour les générations futures de réagir. Les retards dans la lutte contre le changement climatique permettent la poursuite des investissements dans des infrastructures basées sur les combustibles fossiles, renforçant des systèmes qui deviennent ainsi plus difficiles à éliminer. De plus, les effets cumulatifs des émissions signifient que les générations futures feront face à des impacts plus graves – tels que des événements météorologiques extrêmes, des pénuries alimentaires et la montée des eaux – avec moins de ressources et d'options pour y faire face. En l'absence de mécanismes pour garantir la justice intergénérationnelle, ce schéma peut donc s'aggraver, augmentant les dommages pour chacune des générations successives.

Un aspect critique de cette tyrannie est l'*inadéquation des institutions* pour représenter les intérêts des générations futures. Les systèmes politiques et économiques actuels sont conçus pour une prise de décision à court terme. Les cycles politiques donnent souvent la priorité aux réalisations à l'échelle de quelques années, telles que la création d'emplois ou la croissance économique, plutôt qu'aux investissements dans l'action climatique, dont les résultats peuvent prendre des décennies. Les autorités sont réticentes à imposer des réglementations strictes ou des taxes sur les émissions qui pourraient être impopulaires auprès de leur électorat ou nuire aux industries à court terme, même si ces mesures sont nécessaires pour prévenir les catastrophes écologiques et économiques à long terme. Ce décalage entre les calendriers politiques et les calendriers d'action climatique crée une dangereuse inertie. Ce biais institutionnel en faveur du présent marginalise effectivement les considérations éthiques sur l'environnement, la justice et l'équité intergénérationnelle.

Cette tyrannie du présent se manifeste de diverses manières qui font obstacle à une action climatique significative. Les *tactiques de temporisation* sont courantes, les instances politiques repoussant souvent l'adoption de mesures décisives en faisant valoir que les progrès technologiques ou la croissance économique futurs rendront la lutte contre le changement climatique plus facile ou moins coûteuse. De même, les autorités politiques mettent fréquemment l'accent sur les coûts immédiats de la

transition, tout en minimisant les coûts à long terme de l'inaction, qui sont bien plus importants. Les accords internationaux, tels que l'accord de Paris, reflètent cette dynamique en s'appuyant fortement sur des engagements volontaires qui s'alignent sur les intérêts actuels plutôt que sur les besoins des générations futures.

Pour surmonter la tyrannie du présent, Gardiner affirme que le changement climatique doit être considéré comme une *question éthique* plutôt que simplement politique ou économique. Il faut pour cela adopter une perspective à long terme qui donne la priorité aux droits et au bien-être des générations futures, y compris *via* l'utilisation du principe de précaution pour prévenir les dommages irréversibles. Il est également essentiel de **renforcer les institutions mondiales** afin de faire respecter les engagements contraignants et de favoriser la prise de conscience morale des individus et des sociétés face à leurs responsabilités à l'égard de l'avenir. En fin de compte, la lutte contre la tyrannie du présent exige un changement profond de perspective et un engagement plus large en faveur de la justice intergénérationnelle, garantissant que les générations futures héritent d'une planète vivable et durable.

9.2 Les institutions de la gouvernance mondiale

La gouvernance mondiale du climat repose sur un ensemble d'institutions et de cadres collaboratifs qui visent à coordonner les efforts internationaux pour faire face au changement climatique. Parmi les institutions les plus importantes figurent le Giec, la CCNUCC et l'accord de Paris. Ces institutions sont le produit de discussions sur le climat au niveau international depuis près de quatre décennies⁴, et chacune de ces entités joue un rôle spécifique dans l'élaboration, l'évaluation et la mise en œuvre des politiques climatiques.

Giec

Créé en 1988 par l'OMM et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), le Giec constitue le pilier scientifique de la gouvernance climatique⁵. Son rôle principal est de fournir aux autorités politiques des évaluations scientifiques détaillées et objectives sur le changement climatique, ses impacts, les risques associés, ainsi que des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Le Giec ne mène pas de recherches scientifiques lui-même. Il s'appuie sur l'analyse de la littérature scientifique publiée pour produire des rapports d'évaluation qui servent de base aux politiques climatiques internationales. Les évaluations du Giec sont conçues pour guider les gouvernements dans l'élaboration de politiques sans toutefois prescrire des actions spécifiques. Elles incluent des projections climatiques basées sur différents scénarios et des analyses des risques liés au changement climatique et aux stratégies de réponse. Son organisation est intergouvernementale, ce qui signifie que les membres du Giec sont des scientifiques nommés par leurs gouvernements et qu'il est gouverné par les 195 pays membres. Ces derniers participent aux décisions lors de sessions plénières, et un bureau élu par les gouvernements supervise les travaux

scientifiques et stratégiques du Giec. Le Giec est structuré en trois groupes de travail principaux, chacun ayant une spécialisation :

1. **groupe de travail I** : analyse des bases scientifiques physiques du changement climatique ;
2. **groupe de travail II** : étude des conséquences, de l'adaptation et de la vulnérabilité ;
3. **groupe de travail III** : évaluation des stratégies d'atténuation du changement climatique.

Il existe également une équipe spéciale dédiée aux inventaires nationaux de GES et une autre chargée de faciliter la gestion et l'utilisation des données et scénarios climatiques.

Le Giec publie périodiquement des rapports d'évaluation (tous les cinq à sept ans) qui servent de référence pour comprendre les bases scientifiques du changement climatique :

- **rapports d'évaluation** : ils abordent les aspects scientifiques, techniques et socio-économiques du changement climatique ;
- **rapports spéciaux** : focalisés sur des questions spécifiques (par exemple, l'objectif de 1,5 °C) ;
- **rapports méthodologiques** : fournissant des lignes directrices pour les inventaires de GES.

Chaque rapport est révisé à plusieurs étapes pour garantir son objectivité et refléter l'ensemble des points de vue scientifiques. Les rapports d'évaluation, en particulier, sont élaborés de manière exhaustive et transparente. Ils bénéficient des contributions de plus de 2000 scientifiques de plus de 100 pays différents pour leur rédaction et leur révision, et font référence à plus de 30 000 documents scientifiques. Les travaux du Giec jouent un rôle central dans les négociations internationales sur le climat, notamment dans le cadre de la CCNUCC. Ils apportent une base scientifique rigoureuse pour soutenir la prise de décision à tous les niveaux, de la politique mondiale à l'action locale. Leur objectif est d'assurer que les politiques climatiques reposent sur les meilleures connaissances disponibles et de sensibiliser les gouvernements aux risques climatiques.

Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

La CCNUCC est un traité international qui constitue la base légale dans le cadre de laquelle se déroulent les négociations internationales sur le changement climatique. La convention a été établie lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, elle est entrée en vigueur le 21 mars 1994 et a depuis obtenu une adhésion quasi universelle, 198 pays l'ayant ratifiée⁶.

L'objectif premier de la CCNUCC est de « stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Cet objectif doit être atteint dans un délai qui

permette aux écosystèmes de s'adapter naturellement, qui garantisse que la production alimentaire n'est pas menacée et qui permette un développement économique durable. La convention reconnaît les différentes responsabilités et capacités de ses parties, en soulignant que les pays à revenu élevé doivent prendre la tête de la lutte contre le changement climatique et ses effets néfastes. Ce principe de «responsabilités communes mais différenciées» (article 3) reconnaît les différentes contributions des nations à la dégradation de l'environnement et leurs capacités respectives à relever ces défis.

Pour faciliter une action efficace, la CCNUCC a établi un cadre pour la négociation de traités internationaux spécifiques, appelés «protocoles» ou «accords», qui fixent les engagements des pays pour réduire les émissions de GES. Au fil des ans, la CCNUCC a permis l'adoption de plusieurs accords, dont le **protocole de Kyoto en 1997**, qui imposait des objectifs juridiquement contraignants de réduction des émissions pour les pays à revenu élevé, et l'**accord de Paris en 2015**, qui constitue un tournant dans la gouvernance climatique.

La CCNUCC fonctionne par l'intermédiaire d'une COP, qui se réunit chaque année pour évaluer les progrès accomplis et négocier de nouveaux engagements. Ces conférences constituent le principal organe décisionnel de la convention, réunissant des représentants de tous les pays pour évaluer la mise en œuvre de la convention et de tout autre instrument juridique adopté par la COP. Outre les efforts d'atténuation, le cadre de la CCNUCC englobe des stratégies d'adaptation, des mécanismes financiers, le transfert de technologies et le renforcement des capacités afin de soutenir les pays à faible et moyen revenu dans leurs efforts de lutte contre le changement climatique. En encourageant la coopération internationale et en fournissant une plateforme de dialogue, la CCNUCC joue un rôle central dans la réponse mondiale au changement climatique, en s'efforçant de coordonner l'action entre les différents pays.

L'accord de Paris⁷

L'accord de Paris est le traité international actuellement en vigueur, qui précise comment les objectifs généraux de la CCNUCC doivent être poursuivis. L'accord a été adopté le 12 décembre 2015 lors de la COP21 de la CCNUCC, et il est entré en vigueur en 2016 après sa ratification par un nombre suffisamment important de pays. Il a été ratifié par 196 pays, soit presque tous les pays du monde.

Les objectifs de l'accord de Paris, précisés dans son article 2, sont les suivants.

Atténuation : « En contenant l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. »

Adaptation : « En renforçant les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques et en promouvant la résilience à ces changements et

un développement à faible émission de gaz à effet de serre, d'une manière qui ne menace pas la production alimentaire.»

Finance : « En rendant les flux financiers compatibles avec un profil d'évolution vers un développement à faible émission de gaz à effet de serre et résilient aux changements climatiques. »

L'accord de Paris repose aussi sur plusieurs mécanismes clés pour atteindre ses objectifs.

Contributions déterminées au niveau national (CDN) : contrairement au protocole de Kyoto, l'accord de Paris n'impose pas d'objectifs de réduction de manière *top-down*, mais exige de chaque pays de préparer, communiquer et actualiser régulièrement des « promesses » qui reflètent ses ambitions en matière de réduction des émissions de GES. Ces contributions doivent être révisées tous les cinq ans, avec une progression constante en termes d'ambition. Les CDN permettent une flexibilité reconnaissant les différentes capacités et responsabilités des pays, tout en les engageant à contribuer collectivement aux objectifs globaux.

Transparence et responsabilisation : l'accord établit un cadre de transparence renforcé pour le suivi, la communication et la vérification des actions climatiques entreprises par les pays. Ce mécanisme vise à assurer la confiance mutuelle et à évaluer les progrès réalisés vers les objectifs fixés.

Mécanismes de coopération : l'article 6 de l'accord prévoit des mécanismes permettant aux pays de coopérer volontairement pour atteindre leurs CDN, notamment par le biais de marchés du carbone. Ces mécanismes, bien que controversés, sont censés permettre une mise en œuvre plus efficace et économique des mesures de lutte contre le changement climatique.

Soutien aux pays à faible revenu : l'accord reconnaît la nécessité de fournir un soutien financier et technologique pour renforcement des capacités aux pays à faible revenu, afin de les aider à atteindre leurs objectifs climatiques. Les pays à revenu élevé se sont engagés à mobiliser conjointement 100 milliards de dollars par an à partir de 2020 pour soutenir les actions climatiques dans les pays à faible revenu. En réalité, ces financements ont eu beaucoup de peine à se concrétiser et de vifs débats sont en cours au sujet des montants nécessaires, certaines sources les estimant à plus de dix fois supérieurs aux 100 milliards promis⁸. Lors de la COP29 de Baku en 2024, cette promesse a été augmentée à 300 milliards de dollars par an d'ici 2035, mais on reste bien loin des sommes nécessaires et demandées par les pays à faible revenu⁹.

Bilan mondial : tous les cinq ans, un bilan mondial (*global stocktake* en anglais) est réalisé pour évaluer les progrès collectifs vers la réalisation des objectifs de l'accord. Ce processus permet d'informer et de guider les parties dans la mise à jour et l'amélioration de leurs CDN, en vue d'accroître l'ambition climatique au fil du temps (figure 9.1).

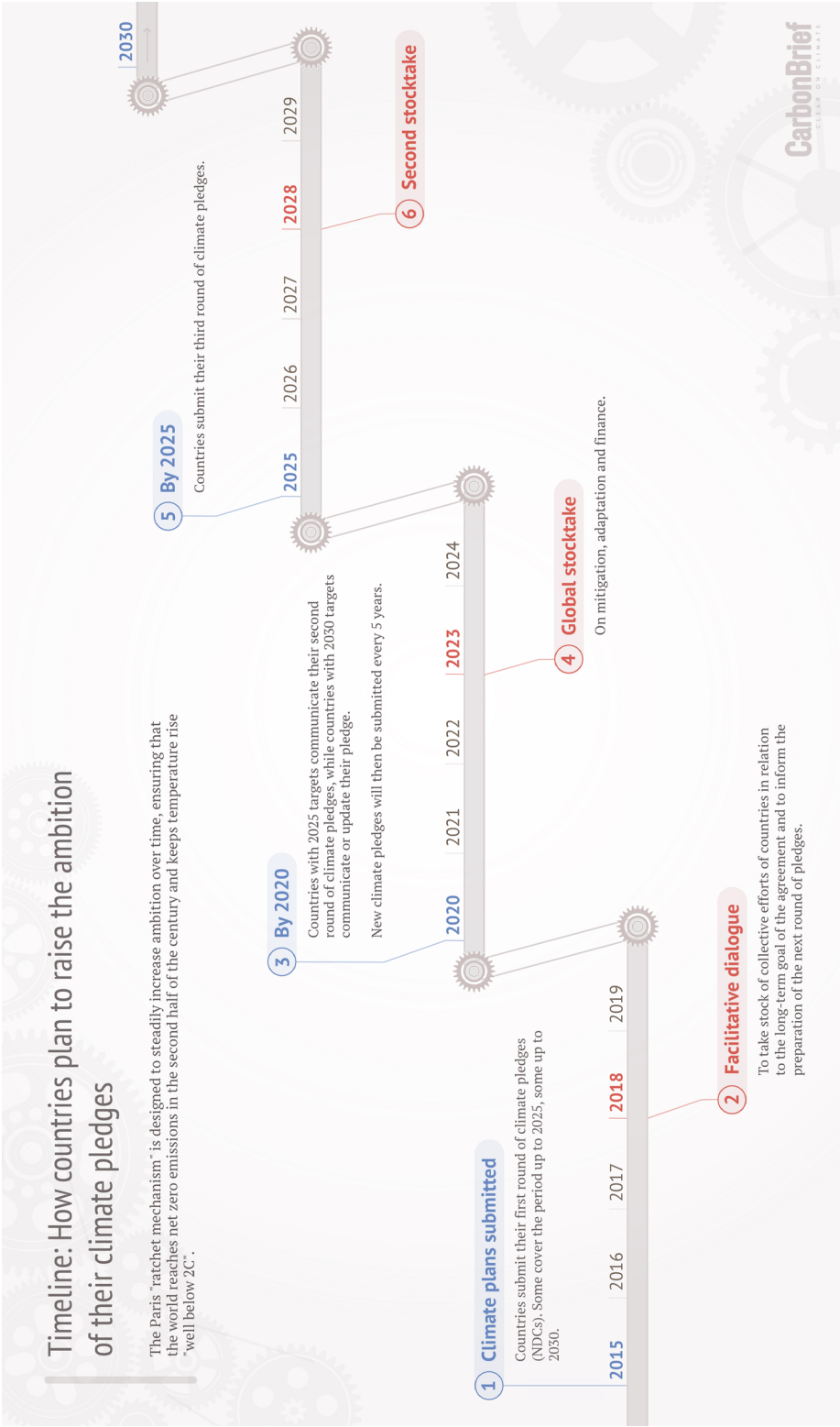


Fig. 9.1 Mécanisme d'accroissement de l'ambition¹⁰.

Coalitions d'États et d'entités infranationales

Au-delà des institutions placées sous l'égide des Nations unies, les coalitions d'États et les relations bilatérales jouent également un rôle essentiel dans la gouvernance climatique mondiale en complétant les accords multilatéraux. Il en va de même des entités infranationales, telles que villes et régions.

Les **coalitions d'États** regroupent des pays partageant des intérêts communs pour agir ensemble. Elles facilitent la mise en œuvre d'objectifs partagés, comme l'Union européenne (UE) qui vise la neutralité carbone d'ici 2050, ou le Climate Vulnerable Forum¹¹ qui amplifie la voix des nations les plus affectées par le changement climatique. Ces alliances permettent aussi l'échange de bonnes pratiques et d'innovations, à l'image de la Powering Past Coal Alliance¹². En outre, elles renforcent le poids des États dans les négociations internationales, comme le font l'Alliance des petits États insulaires (Aosis)¹³ ou le G77. Enfin, certaines coalitions régionales, telles que l'Union africaine, abordent des enjeux spécifiques comme la désertification ou la montée des eaux.

Les **relations bilatérales**, quant à elles, favorisent des collaborations directes entre deux pays et peuvent avoir un impact important lorsqu'elles concernent de gros émetteurs. Par exemple, en 2014, les États-Unis et la Chine ont annoncé un accord bilatéral de coopération pour la réduction des émissions de GES qui a joué un rôle important dans la réussite de la COP21 durant laquelle l'accord de Paris a été signé. Des partenariats similaires existent également, par exemple entre l'UE et l'Inde, pour la promotion des énergies propres, ou entre plusieurs pays européens et l'Afrique de Sud, sur les questions de justice dans la transition énergétique.

Les entités **infranationales** telles que les villes, les provinces et les régions jouent également un rôle crucial dans la gouvernance climatique mondiale. Bien que les États-nations restent les principaux acteurs des accords internationaux, les entités infranationales sont de plus en plus reconnues pour leur capacité à agir concrètement, innover et combler les lacunes de gouvernance. Leur implication est essentielle pour transformer les engagements internationaux en actions concrètes sur le terrain. Ces acteurs disposent souvent de compétences dans des secteurs stratégiques tels que les transports, l'énergie, la gestion des déchets ou encore l'aménagement du territoire, qui sont de grands contributeurs aux émissions de GES. En appliquant des politiques à l'échelle locale ou régionale, ils permettent de concrétiser les objectifs climatiques fixés au niveau national et international.

Par ailleurs, les entités infranationales servent fréquemment de laboratoires d'expérimentation pour des solutions novatrices, comme les projets d'énergie renouvelable, les normes de construction écologique ou les infrastructures intelligentes. Elles s'organisent parfois au sein de réseaux transnationaux comme le C40 Cities¹⁴, ICLEI (Gouvernements locaux pour la durabilité)¹⁵ ou encore la Under2 Coalition¹⁶. Ces plateformes favorisent l'échange de connaissances, le renforcement des capacités et la mise en œuvre d'actions collectives, permettant à ces entités d'amplifier leur influence sur les politiques climatiques mondiales. Ces entités participent le plus souvent à des événements parallèles lors des COP, où elles présentent des exemples concrets

de réussite pour démontrer la faisabilité d'actions climatiques ambitieuses. Elles se distinguent également par leur rôle de premier plan dans l'adaptation et la résilience face aux impacts climatiques. En étant souvent les premières à répondre aux crises comme les inondations, les vagues de chaleur ou les incendies de forêt, elles élaborent et mettent en œuvre des stratégies adaptées aux vulnérabilités locales.

9.3. Obstacles à une action climatique à la hauteur des enjeux

Emissions gap – l'écart entre les objectifs annoncés et la réalité du terrain

Malgré les instruments de gouvernance mis en place ces dernières décennies, les émissions mondiales de GES sont encore largement trop élevées pour atteindre l'objectif principal de l'accord de Paris, soit contenir l'élévation de la température nettement en dessous de 2 °C, et si possible la limiter à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Cette différence entre les objectifs annoncés et la réalité du terrain est nommée *emissions gap* en anglais (l'écart en matière d'émissions). Chaque année le PNUE publie un rapport sur la question, qui fait le point sur les progrès réalisés et les perspectives¹⁷.

Encadré 9.1 Qu'est-ce que la neutralité carbone ?

Le rapport spécial du Giec sur l'objectif de 1,5 °C, publié en 2018, puis le sixième rapport d'évaluation de 2021 ont montré clairement que pour maintenir la hausse de la température globale à 1,5 °C, les émissions mondiales de CO₂ devront atteindre **zéro émissions nettes** vers 2050¹⁸. Ce n'est en effet qu'à partir de ce moment que la température globale cessera d'augmenter. Le Giec définit par ailleurs une situation de zéro émissions nettes de la manière suivante : « Zéro émissions nettes de dioxyde de carbone (CO₂) sont atteintes lorsque les émissions anthropiques de CO₂ sont équilibrées au niveau mondial par les absorptions anthropiques de CO₂ au cours d'une période donnée. Zéro émissions nettes de CO₂ sont également appelées neutralité carbone¹⁹. »

Zéro émissions nettes et **neutralité carbone** sont donc des synonymes à l'échelle globale. Atteindre la neutralité carbone suppose donc d'une part de **réduire** les émissions de CO₂ à un niveau aussi proche que possible de zéro (le Giec mentionne des réductions de 90 à 95 % par rapport à 2020) et d'autre part de **capturer et séquestrer** une quantité de CO₂ atmosphérique équivalente aux émissions résiduelles, grâce à des **techniques d'émissions négatives**. Ces dernières comprennent des mesures dites « fondées sur la nature » telles que la plantation d'arbres ou le stockage du carbone dans les sols, ainsi que des mesures purement technologiques comme la récupération du CO₂ dans l'air ambiant à l'aide de filtres²⁰ (pour plus de détails, voir section 10.2).

Le *Emissions Gap Report 2024* nous apprend ainsi que pour respecter l'objectif des 1,5 °C les émissions mondiales de GES devraient diminuer de 42 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 2019, de 57 % d'ici à 2035 et atteindre la neutralité carbone en 2050 (voir encadré 9.1 ci-après). Les émissions mondiales augmentant encore chaque année, le monde n'est actuellement pas du tout sur une trajectoire alignée avec les objectifs de l'accord de Paris.

La figure 9.2 montre les trajectoires d'émissions à suivre pour atteindre les objectifs de 1,5 °C et de 2 °C, ainsi que les élévations de température auxquelles on peut s'attendre :

- en continuant les politiques climatiques actuellement en place (bleu foncé), ce qui nous mène à une élévation de la température d'environ 3,1 °C ;
- si tous les pays respectent les objectifs qu'ils se sont fixés dans leurs CDN actuels (orange), ce qui nous mène à un réchauffement d'environ 2,8 °C.

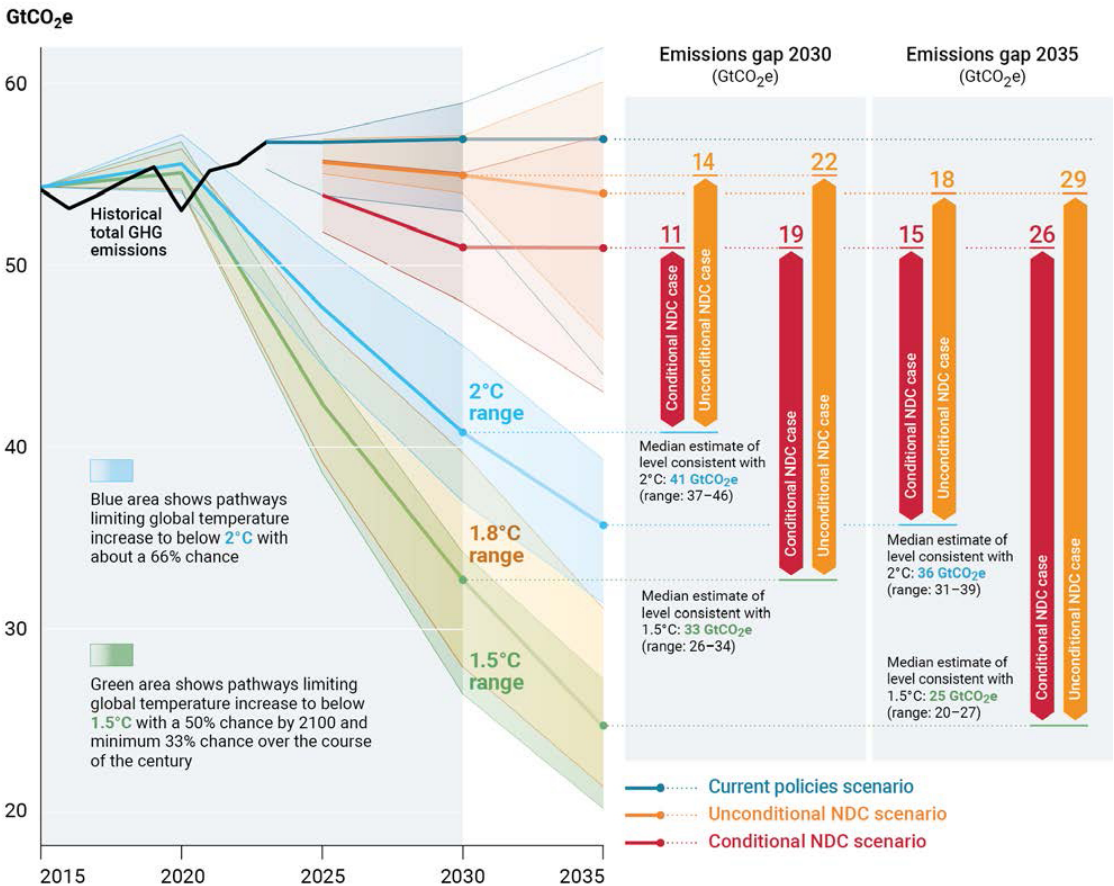


Fig. 9.2 Évolution des émissions de GES selon différents scénarios²¹.

Il y a donc à la fois un problème de ***mise en œuvre*** (aussi parfois nommé *implementation gap*) lié au fait que les pays ne mettent pas en œuvre des réductions d'émissions suffisamment rapides pour respecter leurs propres objectifs, et un problème d'***ambition*** (aussi nommé *ambition gap*) lié au fait que les CDN eux-mêmes, même s'ils étaient respectés, ne sont pas suffisamment ambitieux pour atteindre l'objectif de l'accord de Paris.

Face à ce constat, on peut se demander quelles sont les raisons qui expliquent ce manque d'ambition malgré des décennies de négociations et d'appels à l'action sur la scène internationale ainsi qu'à l'intérieur des pays. Une partie de la réponse a déjà été abordée dans la section 9.1 avec la ***tragédie des communs***, qui explique la difficulté de coordination des acteurs dans les problèmes d'action collective, et la ***tyrannie du présent***, qui met l'accent sur le biais en faveur du court terme dont nos sociétés font preuve. Mais il existe également d'autres facteurs explicatifs, d'ordre politique, économique et social, qui entrent en compte.

Incertitudes, peur du changement et mauvaise gestion

Bien que la science du climat soit très solide, les projections concernant les impacts spécifiques sur les régions reposent sur des modèles complexes qui comportent des degrés d'incertitude variables. Cette ***incertitude*** peut susciter des doutes sur l'efficacité des actions à entreprendre. Les autorités politiques, ainsi que les acteurs économiques, hésitent parfois à s'engager dans des mesures ambitieuses si les résultats ne sont pas garantis. De plus, les incertitudes concernant les coûts de la transition vers une économie bas carbone, tels que les pertes d'emploi dans les industries fossiles ou les perturbations des marchés énergétiques, alimentent une prudence accrue, nourrie par la crainte de répercussions économiques et politiques. La nature à long terme du changement climatique joue également un rôle : alors que les conséquences les plus graves se manifesteront dans plusieurs décennies, les mesures immédiates nécessitent souvent des investissements importants. Ces bénéfices futurs, perçus comme incertains, combinés aux coûts immédiats, rendent les actions ambitieuses moins attrayantes, d'autant plus que l'on tend souvent, par prudence ou aversion au risque, à surestimer les coûts et à sous-estimer les bénéfices en cas d'incertitude.

La lutte contre le changement climatique implique souvent des ***transformations profondes des normes sociétales***, des infrastructures et des modes de vie. Pour de nombreux individus et communautés, ces changements sont perçus comme une menace, en particulier lorsqu'ils touchent à des habitudes, des traditions ou des moyens de subsistance profondément ancrés. Par exemple, la transition vers une économie sans énergie fossile pourrait perturber les industries et les régions dépendantes du charbon, du pétrole ou du gaz, engendrant des craintes de pertes d'emplois, d'instabilité économique et de perte d'identité, comme on le voit dans certaines parties des États-Unis²². En outre, l'adoption généralisée de pratiques durables, telles que la réduction de la consommation ou le recours aux énergies

renouvelables peut sembler, aux yeux de certains groupes de la population, entrer en conflit avec des valeurs sociétales comme le consumérisme ou la liberté individuelle. Ces résistances sont amplifiées par la peur des inégalités : les communautés disposant de moins de ressources redoutent de porter un fardeau disproportionné pendant la transition, d'où l'importance de mettre les questions de justice sociale au centre des politiques climatiques. Ces craintes et incertitudes, attisées par celles et ceux qui ont effectivement tout à perdre de la transition écologique, se traduisent souvent par une résistance politique et un scepticisme public rendant difficile la mise en œuvre de politiques ambitieuses. Les gouvernements privilégient alors des changements progressifs pour éviter les réactions négatives.

La ***gouvernance défailante*** de certains pays entrave aussi considérablement la mise en œuvre de politiques climatiques ambitieuses en créant des inefficacités, en favorisant la corruption et la prise d'influence d'intérêts particuliers, et en affaiblissant les capacités institutionnelles. Une action climatique efficace nécessite des stratégies cohérentes, une planification à long terme et des efforts coordonnés entre les secteurs, ce qui dépend de structures de gouvernance solides. Dans les pays dont la structure de gouvernance n'est pas très bien établie, des institutions fragmentées et un manque de responsabilité entraînent des politiques incohérentes, des priorités mal alignées et des retards dans la prise de décisions, ce qui compromet l'efficacité des initiatives climatiques. La corruption constitue un autre obstacle majeur. Dans les pays où la gouvernance est faible, les ressources allouées aux projets climatiques sont souvent détournées ou utilisées à des fins personnelles, réduisant les fonds disponibles pour des interventions significatives²³. Cela diminue non seulement la confiance publique, mais dissuade également les dons et investissements internationaux, qui sont essentiels pour financer des projets climatiques à grande échelle. En outre, une gouvernance insuffisante entraîne une mauvaise application des réglementations environnementales. Même lorsque des politiques sont adoptées, une application faible des lois et un contrôle limité permettent aux industries et aux individus de contourner les engagements climatiques sans conséquence.

Intérêts particuliers et influence politique

Les intérêts particuliers (*vested interests* en anglais), tant au niveau national qu'au niveau des entreprises, représentent également un obstacle majeur à l'adoption de politiques climatiques ambitieuses. Pour les ***pays producteurs d'énergie fossile***, comme l'Arabie saoudite, la Russie, les États-Unis et d'autres dont les économies dépendent fortement des exportations de pétrole, de charbon ou de gaz naturel, une transition vers un avenir bas carbone menace directement leur stabilité financière et leur influence mondiale. Ces pays craignent que les politiques climatiques réduisent leurs principales sources de revenus et entraînent une stagnation économique ou diminuent leur poids politique dans les relations internationales. Par exemple, les nations exportatrices de pétrole ont historiquement utilisé leur richesse

en ressources pour exercer un pouvoir géopolitique considérable. Un déplacement global vers les énergies renouvelables met en péril cette dynamique, incitant ces pays à résister aux accords climatiques ou à plaider pour des engagements réduits lors des négociations internationales. Cette influence est particulièrement évidente lors des conférences des parties, durant lesquelles l'Arabie saoudite, par exemple, joue depuis des décennies un rôle majeur d'obstruction des négociations. Cela se manifeste notamment par le refus systématique d'objectifs trop ambitieux, par une opposition à un vocabulaire trop explicite dans les textes officiels (raison pour laquelle la notion de « sortie des énergies fossiles » n'a jamais pu être intégrée aux accords sur le changement climatique) et à la mise en avant systématique de solutions technologiques comme la capture du carbone, afin de détourner l'attention de la nécessaire réduction des émissions²⁴.

Les **entreprises du secteur des énergies fossiles** – telles que les compagnies pétrolières, gazières et charbonnières – travaillent également à préserver leur domination. Pour elles aussi, les politiques climatiques ambitieuses représentent une menace directe pour leurs modèles économiques et leurs bénéfices. Elles investissent massivement dans le lobbying, les contributions aux campagnes politiques et les communications stratégiques afin de façonner les débats politiques à leur avantage. Des études montrent que les entreprises d'énergie fossiles dépensent des millions de francs chaque année pour influencer les législateurs et les régulateurs, veillant à ce que les politiques s'alignent sur leurs intérêts²⁵. Elles financent également des groupes de réflexion et des campagnes médiatiques pour semer le doute sur les sciences climatiques (voir section 9.3), retarder le soutien public à l'action et orienter les récits vers des solutions de marché minimisant leur responsabilité. Ces entreprises produisent et diffusent également des arguments économiques pour résister au changement. Elles soulignent souvent les pertes d'emploi potentielles, les coûts accrus et l'instabilité économique que les politiques climatiques ambitieuses pourraient engendrer. Ces affirmations, souvent exagérées, trouvent un écho chez les décideuses et décideurs politiques soucieux des répercussions électorales, en particulier dans les régions économiquement dépendantes des combustibles fossiles.

L'intersection de ces intérêts nationaux et corporatifs amplifie leur impact sur la politique. Le lobbying, le financement des campagnes et le phénomène de « portes tournantes » entre gouvernements et industries garantissent que les décisions politiques sont souvent biaisées en faveur des intérêts particuliers de ces secteurs.

Rejet de la science climatique et désinformation

Alors que les sciences du climat se fondent sur des décennies de recherche et jouissent d'un degré de consensus très élevé parmi les spécialistes (près de 100 %) sur le fait que le climat se réchauffe et que ce réchauffement est d'origine humaine²⁶, la proportion de la population qui doute de ces conclusions reste étonnamment

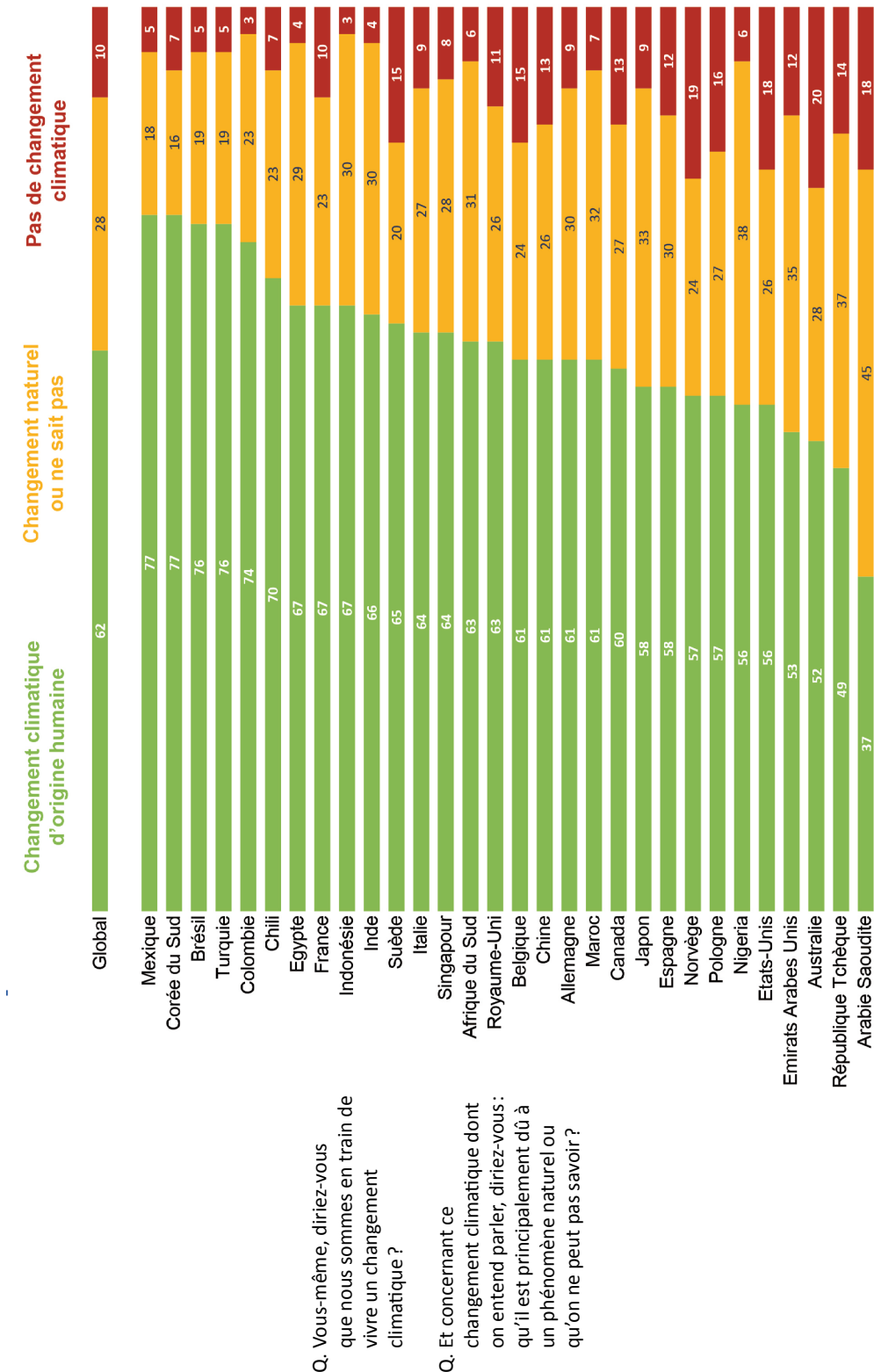


Fig. 9.3 Taux de climatosceptiques par pays²⁷.

élevée. En 2024, 38 % de la population mondiale doutait soit que le changement climatique ait bien lieu, soit qu'il soit d'origine humaine²⁸. Ces chiffres sont restés relativement stables ces dix dernières années avec des variations de quelques pourcents tout au plus. Cette mise en doute des sciences du climat et de leurs conclusions a des effets négatifs sur la détermination de nos sociétés à agir pour contrer le changement climatique, et donne du poids aux partis politiques opposés à de telles mesures.

Le climatoscepticisme est défini comme le rejet des conclusions des sciences du climat. Il se manifeste sous la forme de trois positions principales. Tout d'abord, le rejet de l'**existence même du réchauffement climatique**, bien que cette position devienne de plus en plus marginale à mesure que les preuves s'accumulent. Ensuite, le rejet des **causes humaines du réchauffement**, une part significative des climatosceptiques préférant attribuer ce phénomène à des causes naturelles, telles que le volcanisme ou les cycles solaires, en dépit des preuves scientifiques établissant clairement la responsabilité des émissions anthropiques de GES. Enfin, une troisième position reconnaît l'existence d'un réchauffement d'origine humaine, mais **minimise sa gravité**, arguant que ses effets seront gérables ou que les sociétés et écosystèmes s'adapteront aisément. À ces trois types de positions, on peut encore ajouter deux postures qui ne sont pas à proprement parler climatosceptiques mais qui appartiennent au même registre : les **attaques contre la science climatique** elle-même, qui serait biaisée, non digne de confiance ou politiquement motivée, ainsi que les « **discours de l'inaction**²⁹ », qui ne visent pas directement à nier le changement climatique ou ses causes, mais plutôt à éviter ou ralentir la mise en place de mesures (car trop cher, trop compliqué, inefficace, contre-productif, etc.). Ces différentes positions sont des stratégies argumentatives que l'on peut voir se succéder chronologiquement, soit se retrouver mélangées au sein d'un même discours³⁰.

Le climatoscepticisme ne doit pas être confondu avec le **scepticisme scientifique légitime**, qui repose sur l'examen critique des preuves. Le climatoscepticisme adopte au contraire une démarche inverse, qui consiste à rejeter les faits malgré l'ensemble des preuves disponibles, en cherchant à invalider ces dernières. C'est la raison pour laquelle le terme « climatoscepticisme » est de plus en plus souvent remplacé par d'autres comme « rejet de la science climatique », « négationnisme climatique » (souvent jugé politiquement trop chargé) ou « climato-dénialisme » (de l'anglais *climate denial*). De plus, malgré la prévalence du climatoscepticisme, il est important de bien distinguer ce qui ressort de la **mésinformation**, c'est-à-dire la diffusion d'informations inexacts ou biaisées, souvent de bonne foi ou de manière involontaire en raison d'un manque de connaissances ou de biais cognitifs, de la **désinformation** qui implique une intention délibérée de tromper le public. Cette dernière est souvent orchestrée par des acteurs qui ont des intérêts politiques ou économiques à défendre, par exemple les campagnes financées par l'industrie fossile promouvant des études biaisées ou employant de prétendus spécialistes pour nier les conclusions de la science climatique et pour semer le doute dans l'opinion publique³¹. Ces deux

mécanismes coexistent dans le contexte du climatoscepticisme, la mésinformation étant souvent amplifiée par la désinformation délibérée des groupes d'intérêt.

Le climatoscepticisme repose généralement sur un nombre limité de stratégies rhétoriques qui ont été décrites dans la littérature académique³². L'une des méthodes consiste donc à promouvoir une *pseudo-expertise*, c'est-à-dire des individus présentant des qualifications académiques ou scientifiques, mais sans expertise en sciences du climat. En apparaissant dans les médias ou en publiant des ouvrages critiques, ces figures donnent l'illusion d'une controverse scientifique là où il existe en réalité un consensus quasi complet dans la communauté des spécialistes. Une autre stratégie consiste à poser des *exigences irréalistes* par rapport à ce que l'on peut raisonnablement attendre de la science. Par exemple, les climatosceptiques insistent sur la nécessité de certitudes absolues avant d'agir, ce qui va à l'encontre de la démarche scientifique, fondée sur les notions d'incertitude et d'intervalles de confiance, et à l'encontre du principe de précaution. Le *choix sélectif des preuves*, ou *cherry-picking*, est également très courant : les climatosceptiques isolent des données atypiques, comme une année durant laquelle la température a été particulièrement basse, pour invalider les tendances générales. Cette stratégie s'applique également aux publications, avec la mise en avant de quelques publications isolées et marginales qui mettent en cause le consensus établi (fondé sur des dizaines de milliers d'articles scientifiques). Une quatrième stratégie est le recours à des *sophismes logiques*, c'est-à-dire à des raisonnements qui ont l'apparence d'un raisonnement logique mais qui sont en réalité des raisonnements fallacieux. Par exemple, l'affirmation : « Le climat a toujours changé » sous-entend que puisque le climat a changé naturellement par le passé, le changement actuel est nécessairement naturel lui aussi. Mais il n'y a bien sûr aucun lien logique entre ces deux propositions. Le climat peut tout à fait avoir changé naturellement par le passé et changer sous l'influence des activités humaines aujourd'hui. Enfin, les *théories du complot* complètent les stratégies climatosceptiques en suggérant que les scientifiques ou les institutions internationales orchestrent une manipulation mondiale dans un but politique ou économique³³.

Les raisons du climatoscepticisme

Les motivations qui sous-tendent le climatoscepticisme sont variées. D'un côté, les *biais idéologiques* jouent un rôle crucial. Les recherches en psychologie sociale montrent que les opinions politiques influencent fortement la perception du changement climatique. Une méta-analyse publiée en 2016 (c'est-à-dire une synthèse de 25 sondages et 171 études universitaires dans 56 pays) a montré que les déterminants les plus importants du climatoscepticisme chez une personne étaient l'affiliation politique et l'idéologie politique, bien plus que l'âge, le genre ou le niveau de formation³⁴. Par exemple, les partisans et partisans du marché libre, non régulé, tendent à rejeter les mesures climatiques, car elles impliquent des régulations gouvernementales contraires à leurs convictions³⁵. Aux États-Unis, le climatoscepticisme est devenu une question d'identité politique, la proportion de climatosceptiques parmi

les républicains étant bien plus élevée que parmi les démocrates. Reste que le rejet des sciences du climat peut prendre des formes et des nuances variées. Une étude du collectif ParlonsClimat, spécialisé dans la communication climatique, propose quatre types principaux de profils climatosceptiques³⁶.

La personne sceptique convaincue : plutôt *urbaine* et bien *informée*, qui doute de l'existence du changement climatique, mais dont le niveau de confiance accordé aux scientifiques en général reste élevé.

La personne climato-lésée : plutôt une femme des classes moyenne et populaire, dans la vie active. Ce groupe doute de l'origine du changement climatique, mais ressent surtout une culpabilisation de la part des écologistes qui tentent d'imposer des solutions pour leur faire changer de mode de vie. Pour cette raison, ces personnes affichent un niveau modéré d'opposition aux politiques climatiques.

La personne smart-climato-complot : se trouve surtout parmi des hommes entre 40 et 65 ans, à l'extrême droite de l'échiquier politique. Cette catégorie affiche une défiance élevée envers les scientifiques et leur impartialité, et donc également envers les conclusions des sciences du climat. Elle montre également une forte attitude anti-écologiste et interprète le mouvement écologiste et climatique en termes de complot, comme des tentatives de manipulation de la population. Les personnes appartenant à ce groupe se posent volontiers comme faisant partie de celles et ceux « qui réfléchissent » et n'acceptent pas les vérités toutes faites.

La personne climato-opposante politique : se trouve plutôt parmi des hommes de moins de 35 ans, politisés à l'extrême droite de l'échiquier politique. L'opposition à la lutte contre le changement climatique est pour ces personnes une question d'affrontement politique contre les écologistes, qu'elles jugent trop culpabilisants. Cela se manifeste par un fort rejet des sciences du climat et de la communauté scientifique en général, et par une tendance au technosolutionnisme.

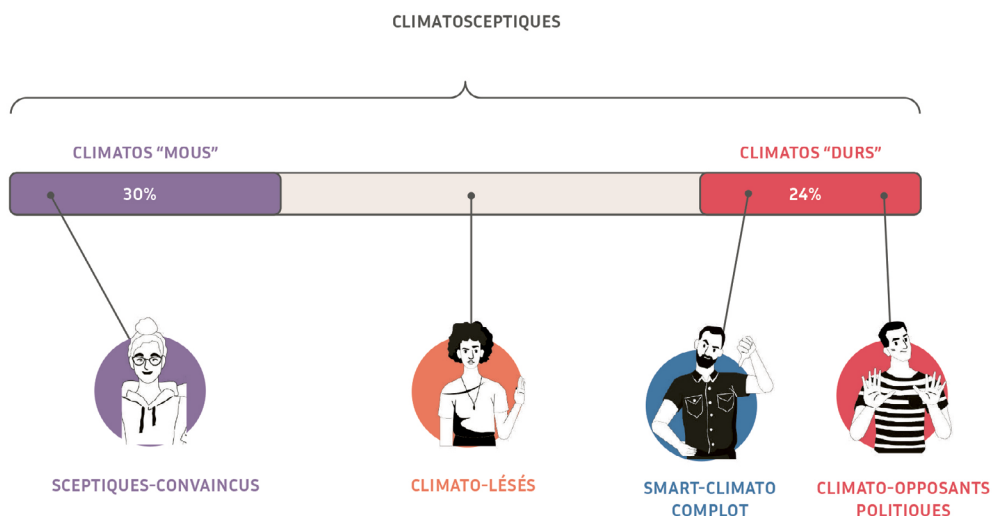


Fig. 9.4 Typologie des profils de climatosceptiques³⁷.

De l'autre côté, les *groupes d'intérêt*, notamment l'industrie des combustibles fossiles, ont activement financé des campagnes de désinformation. Depuis les années 1980, les plus grandes entreprises de l'industrie fossile étaient pleinement conscientes de leur rôle dans le réchauffement climatique mais ont choisi de semer le doute pour protéger leurs profits. Elles ont utilisé des méthodes similaires à celles de l'industrie du tabac, qui avait financé des études et des campagnes pour nier les liens entre le tabagisme, y compris la fumée passive, et le cancer des poumons³⁸. Il a par exemple été démontré que l'entreprise pétrolière ExxonMobil connaissait les risques liés au changement climatique depuis la fin des années 1970, mais qu'elle a malgré tout mis en œuvre des stratégies de délégitimation de la science³⁹. La recherche a également montré que l'industrie fossile agissait, et agit encore, par le biais d'un réseau d'instituts d'ingénierie politique (*think tanks*) conservateur (par exemple le Heartland Institute ou le American Enterprise Institute) qui emploient des scientifiques, non spécialistes du climat et le plus souvent à la retraite, pour mettre en œuvre les stratégies de mise en doute des sciences du climat décrites plus haut (pseudo-expertise, faux rapports scientifiques, articles d'opinion trompeurs, etc.). Le financement de ces *think tanks* conservateurs joue un rôle crucial dans la formation de leurs messages climatosceptiques. Une part importante de leur soutien financier vient de sources dites de *dark money* telles que Donors Trust et Donors Capital Fund, qui facilitent les donations anonymes. Une étude de 2014 estimait que 91 de ces *think tanks* conservateurs disposaient ensemble d'un budget annuel de plus de 900 millions de dollars⁴⁰. Une autre analyse a montré que le niveau de financement par ces donateurs et donatrices anonymes était positivement corrélé à la prévalence des messages climatosceptiques⁴¹.

Le climatoscepticisme entraîne des conséquences importantes, puisqu'en influençant l'opinion publique il entrave potentiellement l'adoption de politiques climatiques ambitieuses. Même si le consensus scientifique est solidement établi – entre 97 % et 100 % des scientifiques et articles spécialisés confirment que le réchauffement est d'origine humaine –, ces stratégies de doute érodent la confiance du public dans la science. Elles retardent les actions nécessaires pour limiter les impacts du changement climatique et accentuent les coûts sociaux et économiques à long terme. Il faut toutefois bien garder à l'esprit que les climatosceptiques ne sont pas un groupe homogène. Tous ne sont pas des adversaires farouches à l'action contre le changement climatique (voir par exemple les personnes sceptiques convaincues, figure 9.4). De plus, le climatoscepticisme ne prend pas racine en premier lieu dans un manque d'information ou de rationalité des individus, mais avant tout dans une divergence de vision du monde et un combat politique contre les mouvements écologistes, en grande partie organisé par l'industrie fossile et les milieux conservateurs.

PARTIE 4

Les instruments de la politique climatique, notamment de la Suisse

Philippe Thalmann

10. Changement climatique : enjeu mondial – réponse nationale

Le changement climatique n'épargne aucun pays, même les plus petits et les plus éloignés des côtes, comme la Suisse, qui se trouve dans une région tempérée. Dans ce chapitre, nous verrons d'abord comment la Suisse est touchée, puis nous aborderons les mesures que toute nation peut prendre pour contribuer à ralentir le changement climatique et pour se protéger de ses effets. On entend souvent qu'un pays qui, comme la Suisse, ne contribue que quelques pour mille des émissions mondiales ne peut pas vraiment influencer le climat et qu'il peut donc s'abstenir de contribuer aux efforts internationaux pour enrayer le changement climatique. Nous verrons cependant que ce n'est pas si simple et qu'il y a même dans un tel cas de bonnes raisons d'adopter une politique climatique ambitieuse.

10.1. Conséquences du changement climatique sur l'économie suisse

La Suisse est particulièrement touchée par le changement climatique (sections 3.3 et 6.3). Depuis le milieu du XIX^e siècle, la température moyenne dans le pays a augmenté deux fois plus que la moyenne mondiale et les scientifiques prédisent que cette tendance se poursuivra. Une augmentation de + 2 °C au niveau planétaire signifierait environ +4 °C en Suisse.

Une équipe de l'École polytechnique fédérale de Lausanne a tenté de chiffrer les impacts économiques du changement climatique pour la Suisse selon différents scénarios¹. Elle a pris en compte les impacts qui se laissent relativement facilement évaluer, soit pour le tourisme d'été et d'hiver, pour l'approvisionnement en eau, pour l'agriculture, pour le besoin de chauffage et de climatisation des bâtiments, pour la productivité des personnes au travail et pour la mortalité. En admettant un scénario de réchauffement qui le stabiliserait à + 3,9 °C en Suisse, soit + 2 °C en moyenne mondiale, le coût total net s'élèverait à 6,5 milliards de francs d'aujourd'hui pour la seule année 2060. Ce montant équivaut, en termes de perte de bien-être pour les ménages, à une diminution de leur consommation de biens et services de 1 %. L'essentiel de ce coût vient de la surmortalité, suivie de la baisse de la productivité au travail, toutes deux causées par les vagues de chaleur. Les hivers plus cléments permettent, en revanche, d'économiser sur le chauffage. Dans l'ensemble, le tourisme d'hiver n'est pas perdant, les stations de haute altitude profitant du report de clients des stations de basse altitude, en particulier celles situées en Italie et en Allemagne.

La perte n'est pas immense, mais l'estimation ne prend pas en compte tous les coûts. Il manque les événements extrêmes qui détruisent des infrastructures et des

bâtiments (inondations, glissements de terrain). Il manque les effets cumulés de la baisse des investissements productifs et de l'apprentissage². Il manque aussi le ressenti de la population face aux vagues de chaleur, aux nuits tropicales et aux hivers sans neige. Il manque enfin les impacts indirects, quand le reste du monde est touché par le changement climatique. Il s'agit des produits alimentaires et fourragers que la Suisse importe en grande quantité et dont les prix vont augmenter. Il s'agit également de ses secteurs d'exportation, plutôt orientés vers le haut de gamme, qui pourraient être affectés par la diminution des revenus dans les pays clients. Il s'agit enfin de ses investissements à l'étranger et de ses assurances, qui pourraient être touchés directement par les effets du changement climatique.

10.2 Comment répondre au changement climatique ?

Le défi

Pour freiner le changement climatique, il faut **diminuer les émissions** de GES. On parle d'**abattement** ou de mitigation pour désigner la réduction des émissions par rapport à une trajectoire sans mesures. Cette trajectoire de référence sans mesures est appelée **scénario de continuité** (« *business as usual* »).

Personne n'émet de GES pour émettre des GES. Ces émissions sont toujours liées à une activité de consommation ou de production. Il s'agit principalement de la production de chaleur pour le chauffage et de force pour la mobilité ou les processus industriels, obtenue en brûlant des vecteurs énergétiques fossiles (charbon, pétrole et dérivés, gaz) ; de la production de ciment, d'acier et d'aluminium, de plastiques et de divers produits chimiques ; ou de l'agriculture intensive et de l'élevage. Réduire les émissions de GES nécessite donc soit d'effectuer ces activités avec moins d'émissions, soit de réduire les activités elles-mêmes.

Réaliser les mêmes activités économiques avec moins d'émissions est possible en utilisant plus **efficacement** les intrants qui occasionnent les émissions (par exemple, voitures consommant moins de carburant pour parcourir 100 km) ou en les **substituant** par des intrants qui occasionnent moins d'émissions (par exemple, moteurs propulsés au méthane), voire pas du tout d'émissions directes (par exemple, propulsion électrique). Pour accroître l'**efficacité** et pour la **substitution**, un investissement initial est généralement nécessaire, mais il permet des économies sur la durée grâce à la réduction des intrants polluants.

La deuxième option – réduire les activités émettrices de GES – implique moins de production et de consommation de biens et services, moins de travail, moins de salaires, moins de profit et de rendement pour notre épargne, *mais pas forcément moins de bien-être* ! Lorsque la réduction des activités est volontaire, on parle de **sobriété**.

L'ensemble des coûts de l'efficacité, de la substitution et de la sobriété constitue les **coûts d'abattement**.

Certaines personnes ne voient que les coûts directs et les contraintes, ou feignent de ne voir que ce volet de l'action climatique lorsqu'ils veulent empêcher la transformation de nos systèmes économiques. Or, si l'on parle des coûts d'abattement, il faut au moins aussi considérer ses bénéfices qui correspondent à la diminution des coûts du changement climatique additionnée des cobénéfices, comme la réduction de la pollution de l'air.

Le coût net d'abattement et les cobénéfices

La réduction des émissions de GES (l'abattement) engendre des **coûts directs** : énergie plus chère, remplacement anticipé d'équipements, renonciation à des activités, perte de revenus et d'emplois dans certains secteurs, etc. Ces coûts sont en partie, voire intégralement dans certains cas, compensés par des économies pour les entreprises et personnes qui prennent les mesures. Le surcoût d'un moteur plus efficace peut être compensé par les économies de carburant ; le coût de l'isolation d'un bâtiment, par les économies d'huile de chauffage ; les emplois perdus dans un secteur, par ceux qui sont créés dans un autre. C'est bien le **coût net** des mesures d'abattement qu'il faut prendre en compte, même s'il peut s'avérer difficile de financer un investissement qui produira des économies réparties sur de nombreuses années. En principe, les acteurs économiques devraient entreprendre toutes les mesures d'abattement dont le coût net est négatif.

Les activités liées aux émissions de GES engendrent non seulement des coûts pour celles et ceux qui prennent la décision d'entreprendre ces activités, mais aussi pour des tiers : on les appelle dès lors **coûts externes** parce qu'ils sont externes aux personnes prenant les décisions qui les causent. Le tableau 10.1 répertorie les coûts externes liés à l'extraction, au transport et à l'utilisation des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), qui sont responsables de trois quarts des émissions mondiales de GES³. Les impacts énumérés affectent la santé publique, augmentent les coûts de production et réduisent les rendements de l'agriculture notamment, déstabilisent des sociétés, etc. Le tableau indique également où ces coûts sont subis.

Tableau 10.1 Coûts externes liés aux énergies fossiles⁴.

Impacts	Où ?
Changement climatique	Tous les pays
Destruction d'écosystèmes	Surtout sur les sites d'extraction, dans une moindre mesure le long de la chaîne de transport et sur les sites d'utilisation (combustion)
Pollution des eaux et des sols	Surtout sur les sites d'extraction, dans une moindre mesure là où les énergies fossiles sont utilisées
Pollution de l'air	Surtout là où les énergies fossiles sont utilisées, dans une moindre mesure sur les sites d'extraction
Risques économiques	Pays producteurs et consommateurs interdépendants
Risques politiques	Surtout dans les pays producteurs, mais aussi prises d'influence politique dans les pays consommateurs (cf. climatoscepticisme)

En diminuant la production et la consommation d'énergies fossiles, on réduit les coûts externes associés. Outre la réduction des coûts du changement climatique, tous les autres énumérés dans le tableau 10.1 sont également concernés. La diminution de ces derniers représente autant de **cobénéfices** de la sortie de ces énergies. Lorsqu'il existait encore des doutes quant à l'urgence de freiner le changement climatique, les cobénéfices étaient souvent mis en avant: « Si vous doutez de l'effet sur le climat du remplacement des chaudières à mazout par des pompes à chaleur, reconnaissez au moins la diminution de la pollution de l'air, de la dépendance aux importations, etc. »

Le tableau 10.1 illustre la diversité des personnes et des territoires subissant les coûts externes de l'utilisation d'énergies fossiles. Cela signifie que lorsqu'on en utilise moins, on génère des bénéfices climatiques et des cobénéfices très dispersés. Du point de vue d'un territoire qui envisage cela, les retombées peuvent être appréciées de diverses façons, comme l'illustre le tableau 10.2: on peut ne s'intéresser qu'aux impacts du changement climatique et seulement pour le territoire lui-même (CL), ou à ces impacts plus les autres coûts externes locaux (CL + AL), ou aux impacts du changement climatique dans le monde entier (CL + CG), ou enfin à tous les coûts externes engendrés par l'utilisation d'énergie fossile (CL + AL + CG + AG).

Tableau 10.2 Points de vue possibles sur les coûts externes⁵.

	Coûts externes locaux	Coûts externes globaux
Coûts externes liés au changement climatique	CL	CG
Autres coûts externes (non climatiques)	AL	AG

Abattement optimal

Comme l'abattement engendre des coûts et des bénéfices, il est tentant de les mettre en balance. On peut même aller plus loin et essayer d'évaluer jusqu'où il faut aller dans l'abattement pour que cela « en vaille encore la peine », donc pour que les bénéfices dépassent les coûts. On parle d'**abattement optimal**.

Cette analyse est illustrée par la figure 10.1 pour une ville, un canton, un pays, un groupe de pays, voire toute la planète. La réduction des émissions est mesurée sur l'axe horizontal, en tonnes de CO₂ évitées par exemple. Sans abattement, les coûts externes causés par les activités émettant des GES, notamment les coûts du changement climatique, sont représentés par la ligne horizontale traitillée. Grâce à l'abattement, ces coûts externes diminuent (courbe pointillée). Les bénéfices correspondant à un certain niveau d'abattement, donc à un point de l'axe horizontal, sont mesurés par la distance entre la ligne horizontale et la courbe pointillée au-dessus de ce point.

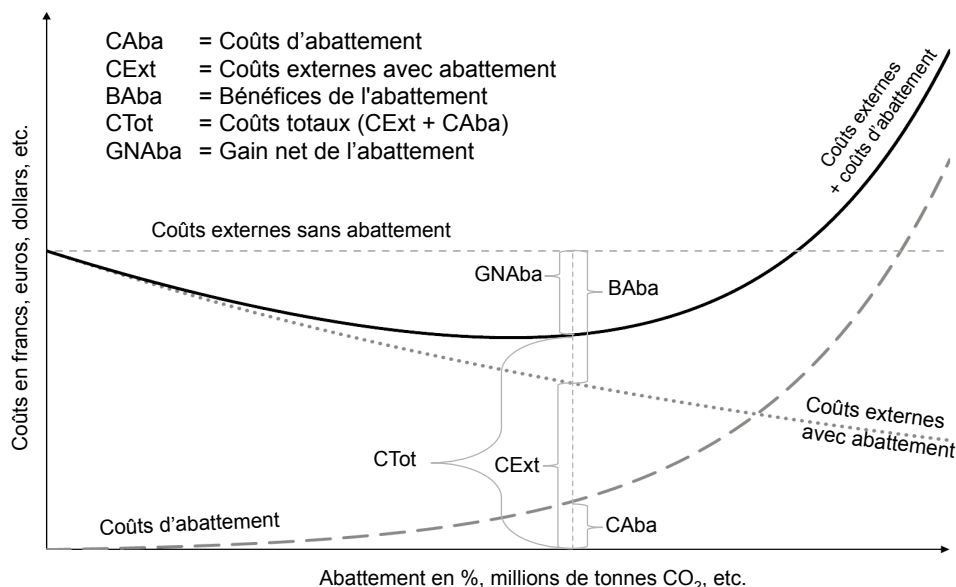


Fig. 10.1 Schéma des coûts avec réduction des émissions⁶.

L'abattement n'est pas gratuit ; son coût augmente même plus que proportionnellement avec l'effort fourni, puisqu'on choisit d'abord les mesures qui coûtent le moins par tonne évitée. Ceci donne une forme convexe à la courbe traitillée qui représente les coûts d'abattement dans la figure 10.1. La somme des coûts d'abattement et des coûts externes restants est représentée par la courbe continue, qui commence par baisser quand des mesures d'abattement peu coûteuses permettent d'éviter les coûts externes les plus importants, puis qui augmente quand les mesures d'abattement deviennent plus coûteuses et les coûts externes évités moins importants. Un territoire qui suivrait une logique de minimisation des coûts devrait viser l'effort d'abattement correspondant au point le plus bas de la courbe du coût total.

Les coûts externes peuvent inclure plus ou moins d'impacts non climatiques et non locaux, selon le tableau 10.2, ce qui change évidemment la forme de la courbe correspondante et déplace le point minimum de la courbe du coût total. Moins le territoire prend en compte de coûts externes et moins le niveau optimal pour ses efforts d'abattement est élevé. On postule souvent qu'un « petit pays » ne peut pas, à lui seul, affecter le changement climatique par la réduction de ses émissions (ce sujet sera abordé dans la section 10.3). Dans ce cas, les coûts externes correspondant à CL dans le tableau 10.2 sont constants. Il est moins évident que ses émissions n'ont pas d'impact à l'échelle mondiale. En effet, même si l'impact climatique de ses émissions est faible, le fait que cet impact touche potentiellement des milliards de personnes pendant des centaines d'années le rend non négligeable⁷.

Émissions négatives et atténuation

Réduire les émissions de GES n'est pas la seule manière de freiner le changement climatique ni de réduire les dommages qui y sont liés (figure 10.2). En théorie, on peut contrer l'effet de serre par des mesures faisant écran au rayonnement solaire, par exemple en favorisant la formation de nuages ou en injectant des particules réfléchissantes dans la stratosphère. On est encore très loin, cependant, de pouvoir faire ceci à une échelle suffisante et de comprendre toutes les répercussions. Comme ces répercussions pourraient être catastrophiques, les mesures de **géo-ingénierie** à grande échelle sont considérées comme extrêmement risquées.

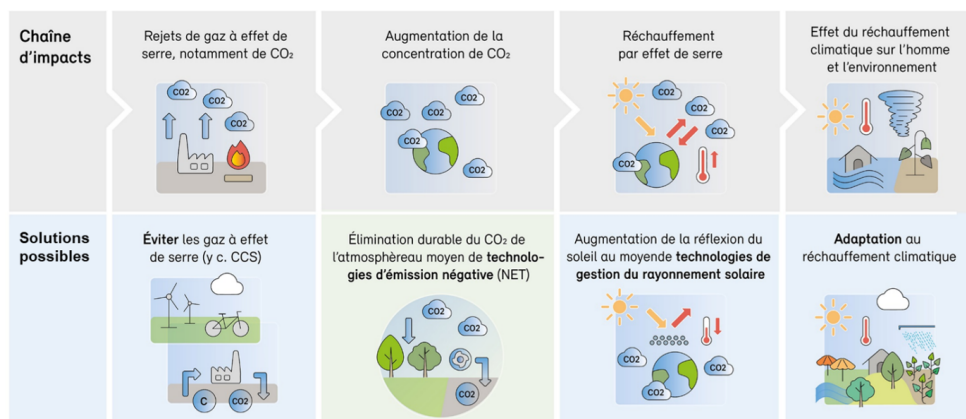


Fig. 10.2 Les grandes familles de mesures pour freiner le changement climatique et réduire ses effets⁸.

Retirer du CO₂ de l'atmosphère n'est plus seulement une théorie, puisque de nombreux pays comptent là-dessus pour atteindre leur neutralité carbone. Ainsi, la loi suisse sur le climat et l'innovation prévoit qu'en 2050 soit retirée de l'atmosphère une quantité de CO₂ équivalente à celle des GES encore émis cette année-là, atteignant ainsi **zéro émissions nettes** ou **zéro net**⁹. Après 2050, les **émissions négatives** doivent même dépasser les émissions résiduelles. Le raisonnement sous-tendant cet objectif est que certaines émissions de GES ne peuvent pas être totalement évitées à des coûts raisonnables, principalement dans l'agriculture, la production de ciment et l'incinération de déchets. Pour ne plus contribuer au réchauffement, il faut donc compenser ces émissions pratiquement inévitables.

Les principales manières de retirer du CO₂ de l'atmosphère sont les suivantes¹⁰ :

- mesures biologiques : reboiser, restaurer le carbone du sol, restaurer des marais, produire et enfouir du biochar, incinérer de la biomasse en captant et enfouissant le CO₂ émis ;
- technologies chimiques : accélérer la séquestration du carbone dans des roches par altération chimique ;
- technologies artificielles : aspirer de l'air pour en séparer le CO₂ puis l'enfouir.

Abattement et émissions négatives contribuent ensemble à l'**atténuation** du changement climatique par rapport à un scénario sans ces mesures. La figure 10.3 illustre la manière dont les émissions négatives permettent de limiter les coûts d'atténuation pour un pays qui s'est fixé un objectif tel que l'élimination totale de ses émissions en 2050. Le volume total des émissions à éliminer correspond à la distance entre les deux axes verticaux. Si le pays ne misait que sur l'abattement pour atteindre cet objectif, il lui en coûterait la somme représentée par la hauteur de la courbe traitillée des coûts d'abattement lorsqu'elle atteint l'axe vertical de droite. Moins d'abattement signifie qu'il doit éliminer le reste par des émissions négatives. Celles-ci sont mesurées sur l'axe horizontal de droite à gauche. Leur coût est représenté par la courbe pointillée. La somme des coûts d'abattement et des coûts des émissions négatives correspond au coût total pour le pays de l'atteinte de son objectif. On voit bien que les émissions négatives permettent d'abaisser ce coût par rapport à la situation où l'abattement serait la seule mesure possible.

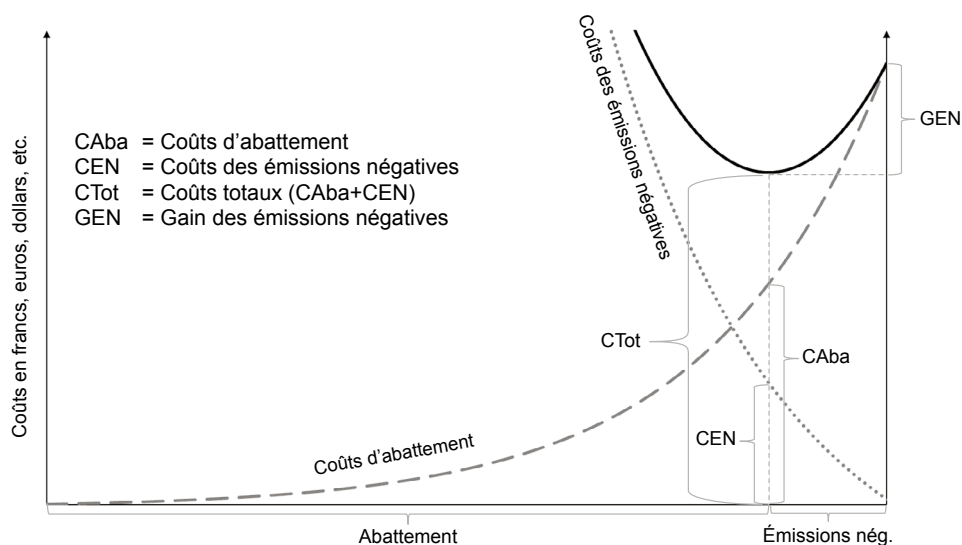


Fig. 10.3 Schéma des coûts d'atténuation avec combinaison d'abattement et d'émissions négatives¹¹.

Une autre façon de représenter les émissions négatives est de les considérer comme des mesures équivalentes aux mesures d'abattement, qui sont choisies lorsqu'elles coûtent moins que ces dernières. Admettons, par exemple, qu'il existe une solution permettant de retirer quelques centaines de milliers de tonnes de CO₂ de l'atmosphère pour 300 francs par tonne. Cette solution se situerait alors sur la courbe d'abattement de la figure 10.1, entre les mesures d'abattement coûtant moins de 300 francs par tonne et celles coûtant davantage. Cette courbe devient alors une courbe des coûts d'atténuation.

En l'état actuel des choses, les émissions négatives sont encore bien trop coûteuses pour être mises en œuvre à grande échelle. Les mesures d'abattement sont également largement insuffisantes pour freiner le changement climatique, d'où les impacts déjà observés et la nécessité de les amoindrir et de prévoir les prochains encore plus importants en s'adaptant au changement climatique.

Adaptation

L'**adaptation** comprend toutes les mesures prises par les autorités politiques, acteurs économiques et individus pour atténuer les impacts du changement climatique, voire profiter de ses effets positifs. Elle peut être réactive – adaptation aux impacts déjà observés – ou préventive.

Les principales mesures d'adaptation au changement climatique sont les suivantes :

- anticiper : observer, mesurer, prévoir et simuler les effets du changement climatique ;
- se protéger contre les effets du changement climatique :
 - occupation du territoire : quitter les régions côtières, les zones exposées, etc. ;
 - ouvrages : ériger des digues, des barrages, des réservoirs et des systèmes d'irrigation ;
- modifier ses pratiques :
 - agriculture : changer de cultures pour utiliser des cultures résistantes au changement climatique,
 - tourisme : réorienter l'offre,
 - diversifier ses activités économiques ;
- s'assurer :
 - partager les risques : assurances, actifs financiers adossés aux catastrophes naturelles,
 - constituer un fonds pour préfinancer la compensation ou la réparation des effets du changement climatique.

Attention toutefois : l'adaptation exige aussi des ressources et des efforts. Comme pour toutes les mesures de protection contre les dangers naturels, il convient de mettre en balance le coût de ces mesures et les bénéfices attendus, à savoir la réduction des dommages subis. La figure 10.4 illustre ce principe. Elle ressemble à la figure 10.1, sauf que c'est l'ampleur des mesures d'adaptation qui est représentée sur l'axe horizontal et que les coûts externes réduits par l'adaptation ne sont pratiquement que les coûts subis par le territoire du fait du changement climatique (CL dans le tableau 10.2). Ces coûts diminuent le long de la courbe pointillée à mesure que le territoire s'adapte davantage au changement climatique. Lorsqu'on additionne ces coûts et ceux des mesures d'adaptation, on obtient la courbe continue des coûts totaux. Un pays qui n'envisagerait que l'adaptation comme réponse au changement climatique et qui ne se préoccuperait pas des conséquences pour les autres devrait viser le point le plus bas de cette courbe.

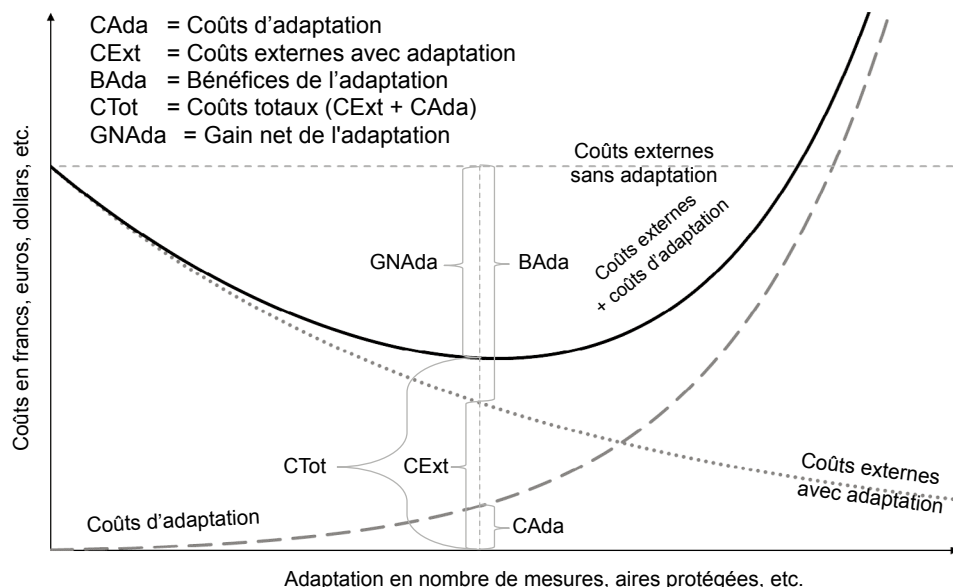


Fig. 10.4 Schéma des coûts avec adaptation¹².

Adaptation versus atténuation

Quand on ne mise que sur l'adaptation, la diminution des coûts du changement climatique ne comprend pas les cobénéfices du tableau 10.1, puisque les émissions de GES ne diminuent pas. Une autre différence importante entre l'atténuation et l'adaptation est que la première est altruiste – le monde entier profite de la diminution des émissions sur un territoire ou des GES retirés de l'atmosphère – alors que l'adaptation est « égoïste » – elle ne protège que le territoire qui s'adapte. L'adaptation d'un territoire peut même nuire à d'autres, par exemple lorsque les digues protectrices accroissent le risque d'inondations en aval, lorsque les retenues d'eau accroissent la sécheresse en aval, ou lorsque l'aide au tourisme d'hiver dans un canton réduit la demande dans un autre. Enfin, l'adaptation peut aggraver le changement climatique, par exemple avec la généralisation de l'air conditionné tant que l'électricité est produite avec de l'énergie fossile, ou avec la promotion touristique qui attire des touristes venant en avion d'outre-mer.

En revanche, l'adaptation nécessite moins de coordination internationale pour être effective que l'atténuation. Il est aussi plus facile de la faire accepter par celles et ceux qui placent l'égoïsme au-dessus de l'altruisme ou de la réciprocité. L'adaptation ne peut, cependant, pas prévenir tous les dangers liés au changement climatique et effacer tous ses effets. Si la communauté scientifique encourage les nations à limiter le réchauffement à + 1,5 °C, c'est principalement parce qu'il devient très difficile, voire impossible, de s'adapter aux effets prévisibles d'un réchauffement plus élevé¹³.

Dans un monde idéal, les territoires combineraient atténuation et adaptation. Ils réduiraient leurs émissions et retireraient du CO₂ de l'atmosphère selon leurs

capacités, pour éviter les conséquences ingérables du changement climatique. Ils s'adaptent pour gérer les conséquences inévitables du changement climatique. Ils prendraient toutes ces mesures de façon à minimiser la somme des coûts d'atténuation, d'adaptation et des coûts externes résiduels. Ceci est illustré par la figure 10.5. L'atténuation est représentée sur l'axe horizontal comme l'abattement dans la figure 10.1. La ligne traitillée horizontale représente les coûts externes en l'absence de toute mesure. Même sans atténuation, donc le long de l'axe vertical, l'adaptation permet de réduire ces coûts, principalement les coûts du changement climatique subis sur le territoire, mais elle vient avec ses propres coûts. En général, augmenter l'atténuation permet de réduire l'adaptation, si bien que la somme des coûts d'atténuation et d'adaptation (courbe en petits traitillés) se rapproche des seuls coûts d'atténuation (courbe en grands traitillés).

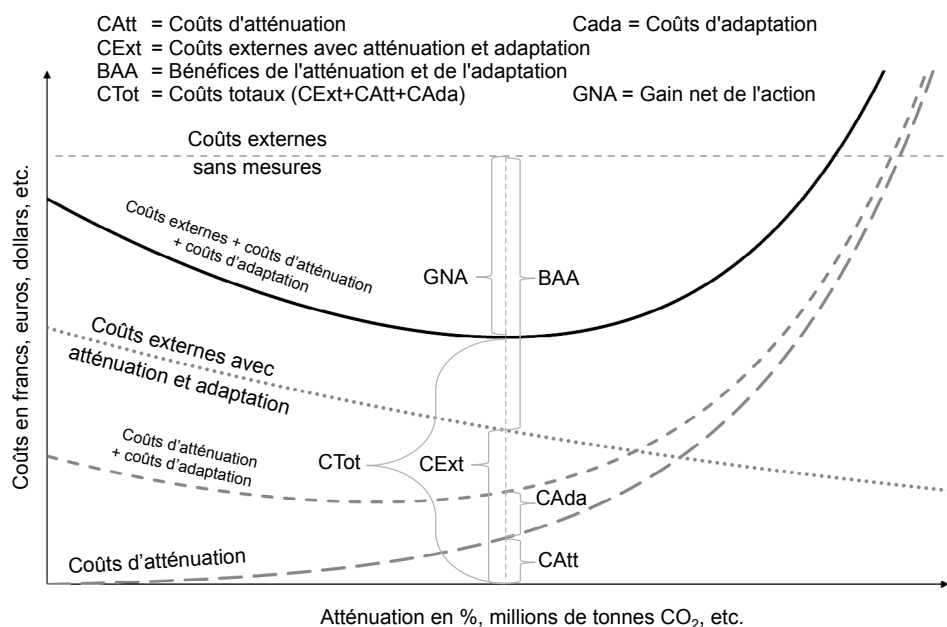


Fig. 10.5 Schéma des coûts avec atténuation et adaptation¹⁴.

La figure 10.5 permet de comparer le coût de l'action climatique avec le coût de l'inaction, deux concepts couramment utilisés dans le débat politique. Le **coût de l'action** est la somme des coûts d'atténuation et d'adaptation (courbe en petits traitillés, CAtt + CAda). Il dépend de la combinaison de mesures d'atténuation et d'adaptation choisie. Le **coût de l'inaction** correspond aux coûts du changement climatique qu'on aurait pu éviter par l'action. Il est représenté par la distance entre la courbe en pointillés et l'horizontale en traitillés (BAA). On peut aussi appeler ceci le **gain de l'action**. Le **gain net de l'action** est égal au gain de l'action moins le coût de l'action (GNA).

Réponses réelles au changement climatique

Dans le monde réel, on est très loin de voir les mesures d'atténuation et d'adaptation qui permettraient de maximiser le gain de l'action climatique. En effet, les coûts de l'action et de l'inaction sont répartis entre de nombreux acteurs, qui défendent chacun leurs propres intérêts. Les entreprises en place et les consommatrices et consommateurs actuels peuvent bien mieux le faire que les nouvelles entreprises de la transition et les populations futures principalement affectées par le changement climatique.

La plupart des pays peinent même à réduire leurs émissions de GES. Lors des négociations internationales, ils se mettent d'accord sur une limite de réchauffement qui leur semble compatible avec le coût des mesures à mettre en balance, puis ils promettent de réduire leurs émissions pour ne pas dépasser cette limite. L'analyse de leurs engagements montre qu'ils ne suffisent pas pour éviter un réchauffement qui dépasse la limite fixée (voir section 9.3). Elle montre, de surcroît, que les mesures réellement prises par les pays pour réduire leurs émissions ne suffisent même pas pour respecter ces engagements insuffisants.

Les raisons de ce manque d'engagement des pays ont été développées dans le chapitre 9. Pour un petit pays comme la Suisse, dont les émissions de GES représentent quelques pour mille des émissions mondiales, le problème de l'action collective se pose particulièrement (voir section 9.1). Les autres obstacles à l'action climatique (voir section 9.3) existent évidemment aussi en Suisse. Il y a même des intérêts économiques considérables à défendre, bien que le pays ne produise pas d'énergies fossiles. En effet, nous avons dépensé 18,5 milliards de francs pour l'énergie fossile en 2023, dont 10,3 milliards pour les importations, 6,6 milliards en taxes et impôts et 1,5 milliards encaissés comme revenus par les importateurs et distributeurs¹⁵.

10.3 L'intérêt de réduire ses émissions de GES pour un petit pays (comme la Suisse)

Environ un millième des émissions mondiales de CO₂ provient du territoire helvétique. Par conséquent, il serait illusoire de penser que la Suisse puisse freiner le changement climatique directement en réduisant ses émissions. Quelles sont donc les raisons de le faire ?

Voici cinq motifs de réduire les émissions dans un petit pays (sans attendre les autres).

Raison n° 1 : assumer sa responsabilité

La Suisse a signé et ratifié toutes les conventions internationales en lien avec le climat : CCNUCC (Rio, 1992), protocole de Kyoto (COP3, 1997), accord de Copenhague (COP15, 2009), accord de Paris (COP21, 2015). Elle joue un rôle moteur dans les négociations internationales et a été le premier pays à publier ses « Contributions prévues déterminées au niveau national » (CDN) en vue de la COP21. Les

autorités de ce pays paraissent vouloir assumer leurs responsabilités. Après tout, chaque province de Chine, chaque État des États-Unis pourrait arguer de sa petite taille pour ne pas bouger. La Suisse se considère comme faisant partie de l'Europe. Ses engagements pour le climat sont généralement alignés sur ceux de l'UE. En revanche, elle n'accepte pas encore d'assumer sa responsabilité historique (voir section 8.2).

Raison n° 2: en retirer des avantages économiques

Beaucoup de mesures permettant de réduire les émissions de GES ont un coût faible, voire négatif pour qui les prend¹⁶ ! Il s'agit principalement de mesures permettant de réduire les frais d'énergie et d'améliorer son image commerciale. Pour la Suisse, se passer d'énergies fossiles, c'est économiser les milliards dépensés pour les importer (10,3 milliards de francs en 2023, soit 1,3 % du PIB de cette année). Remplacer les importations d'énergies fossiles, souvent en provenance de pays peu recommandables ou instables, par des énergies domestiques (hydraulique, photovoltaïque, éoliennes) permet, en outre, de réduire le risque de dépendance. Investir dans la production domestique d'énergie et dans l'efficacité énergétique crée des emplois et des revenus en Suisse. Les plus optimistes envisagent même une croissance économique « verte ». Cette croissance serait soutenue par les innovations liées aux mesures de décarbonation (*cleantech*) qui pourront être exportées vers les pays adoptant également de telles mesures (*first mover advantage*).

L'essentiel est d'adopter dans un premier temps les mesures de réduction des émissions de GES qui coûtent le moins, tout en se préparant aux mesures plus coûteuses qui seront nécessaires pour ramener l'impact climatique du pays à zéro (voir figure 10.1).

Raison n° 3: rendre son environnement plus sain

On a déjà évoqué les autres retombées positives de la politique climatique, les cobénéfices (tableau 10.1) : moins de pollution de l'air¹⁷, des sols et des eaux ; moins de dégradations des bâtiments et de pertes de rendement agricole du fait de ces pollutions, avec des produits moins contaminés. Certaines personnes anticipent même des modes de vie plus sains et plus heureux dans un monde moins pollué.

Raison n° 4: développer des solutions qui aident les autres pays

La réduction des émissions de GES repose souvent sur de nouvelles technologies. Celles-ci sont initialement coûteuses, mais leur coût diminue à mesure qu'elles se généralisent. En les développant, en les adoptant en premier et en les améliorant, on les rend plus accessibles aux autres. La Suisse, avec ses revenus et compétences techniques élevés, est souvent pionnière en matière de nouvelles technologies. En étant pour des technologies permettant de réduire les émissions de GES, elle peut les rendre plus accessibles aux autres pays.

La plupart des innovations techniques permettant de réduire les émissions de GES ne s'imposent pas d'elles-mêmes, en tout cas pas assez rapidement. En effet, les pratiques ancrées et les investissements déjà consentis offrent trop d'avantages aux activités émettrices de GES. La résistance au changement des milieux profitant des énergies fossiles, de l'agriculture intensive, de la déforestation ou de la mobilité intensive en carbone est forte. Il faut donc aussi des innovations politiques et sociales pour la surmonter. Il faut combiner judicieusement la contrainte, l'incitation et la compensation. C'est cela qui fait une politique climatique effective, donc capable de faire baisser rapidement les émissions de GES. Les expériences d'un pays dans ce domaine sont observées et, quand elles fonctionnent, elles sont imitées par d'autres pays.

Raison n° 5 : encourager les autres pays à suivre l'exemple

Les pays qui parviennent à réduire leurs émissions sans mettre en péril leur économie montrent aux autres que c'est possible, ce qui devrait réduire la résistance dans ces pays. À l'inverse, les pays à faibles revenus ne vont pas consentir à faire ce qu'ils considèrent comme des sacrifices pour le climat si les pays riches, même petits, ne le font pas en premier. C'est encore moins le cas s'il s'agit de pays qui profitent largement du marché mondial des énergies fossiles, comme la Suisse (voir ci-après).

La lutte contre le changement climatique serait évidemment plus efficace si tous les pays y contribuaient. Cependant, attendre que ce soit le cas prendrait beaucoup trop de temps. Par ailleurs, agir seul est risqué, car la compétitivité pourrait être compromise. La solution intermédiaire consiste à constituer des « clubs » de pays ambitieux, c'est-à-dire des regroupements de territoires qui s'engagent ensemble à réduire leurs émissions de GES (voir section 9.2, « Coalitions d'États et d'entités infranationales »). Ensuite, ces clubs recherchent de plus en plus d'adhérents. La possibilité de cette démarche a été démontrée avec le protocole de Montréal visant à interdire les substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Signé en 1987 par 24 pays, il est aujourd'hui appliqué par 196 pays.

En fait, la Suisse n'est pas si petite que cela

Douze villes en Chine et onze états aux États-Unis comptent plus d'habitantes et d'habitants que la Suisse¹⁸. Néanmoins, cette dernière est traitée comme un acteur de premier plan au niveau international. Cela s'explique par le fait que ce pays est une plaque tournante de la finance internationale. « Au total, les actifs sous gestion dans les banques en Suisse s'établissaient fin 2020 à 7878,7 milliards de francs. La Suisse est le leader mondial du *private banking* transfrontalier : un quart des actifs sous gestion transfrontalière dans le monde sont gérés en Suisse¹⁹. » De plus, les compagnies d'assurances suisses font partie des plus grandes du monde (SwissRe). Enfin, « la Suisse est la première place mondiale du négoce de matières premières. Selon les estimations, sa part du marché mondial du pétrole s'élève à 35 %, des métaux à 60 % et du sucre et des céréales à 50 % chacune²⁰ ».

Tout cela confère à la Suisse des leviers disproportionnés, par rapport à sa taille, pour influencer les émissions de GES dans le monde.

Tableau 10.3 Émissions de GES mondiales contrôlées ou influencées depuis la Suisse en 2019²¹.

Émissions de GES en lien avec la Suisse	Mt CO ₂ eq
En Suisse	46
À l'étranger, liées aux produits importés	69
À l'étranger, contrôlées par des entreprises domiciliées en Suisse (estimation)	300-400
À l'étranger, liées aux investissements et crédits aux entreprises contrôlés depuis la Suisse (estimation)	700-900
À l'étranger, liées aux crédits aux États (estimation)	150-1 100
TOTAL	1 265-2 515
Émissions mondiales de GES	54 000
Part des émissions en lien avec la Suisse aux émissions mondiales	2,3 - 4,7 %

NOTE : Les émissions de tous les GES ont été converties en équivalents CO₂.

11. Leviers et instruments de la politique climatique

Lorsqu'un territoire (pays, canton, ville, commune) décide de contribuer à l'atténuation du changement climatique en réduisant ses émissions de GES, se pose la question du « comment ». En effet, la tâche n'est pas si simple, car ces émissions sont liées à presque toutes nos activités. On pourrait évidemment réduire ces activités elles-mêmes, mais ce n'est pas le seul levier possible, comme nous allons le voir dans le cas de la décarbonation, c'est-à-dire de l'élimination des émissions de CO₂. Une fois que l'on a identifié les leviers à actionner pour réduire les émissions, il faut encore trouver le moyen de les faire bouger dans un système à la fois décentralisé (un grand nombre de personnes et d'entreprises émettent des GES) et démocratique. On parle d'instruments de la politique climatique pour désigner les moyens dont disposent les pouvoirs politiques pour amener tous ces émetteurs à réduire leurs émissions. La présentation des différents types d'instruments possibles sera illustrée par ce qui se fait en Suisse, puisque ce pays a recours à pratiquement tous les types d'instruments.

11.1 Grands déterminants des émissions de CO₂

Pour mesurer le défi de la décarbonation, il est habituel de se référer à l'**identité de Kaya**¹. Il s'agit d'une formule simple qui décompose les émissions de CO₂ d'un territoire en produit de quatre facteurs :

1. la population, de façon à capter la dynamique démographique ;
2. le PIB par personne, qui mesure le niveau d'activité économique ou de **prospérité** matérielle ;
3. le rapport entre la consommation finale d'énergie et le PIB, qui mesure l'**intensité énergétique** des activités économiques, c'est-à-dire l'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée ;
4. le rapport entre les émissions de CO₂ et la consommation finale d'énergie, qui mesure l'**intensité carbone** de l'énergie, donc le type d'énergie utilisée

$$\text{Émissions de CO}_2 = \text{Population} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Énergie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{CO}_2}{\text{Énergie}}$$

Cette décomposition permet d'expliquer pourquoi les émissions de CO₂ ont évolué comme elles l'ont fait par le passé. La croissance démographique et économique (facteurs 1 et 2) tend à pousser les émissions à la hausse. Comme la population suisse a augmenté de 32 % entre 1990 et 2023 et le PIB par personne, de 29 %, les émissions auraient pu augmenter de 70 % comme le PIB total (tableau 11.1, colonne

des facteurs de croissance). La diminution de l'intensité énergétique (facteur 3) et celle de l'intensité carbone (facteur 4) ont freiné la croissance des émissions et même permis qu'elles baissent. Le facteur 3 aurait fait diminuer les émissions de CO₂ à lui tout seul, donc si rien d'autre n'avait changé, de 43 % (= 0,57 – 1) et le facteur 4, de 24 % (= 0,76 – 1). Au total, les émissions de CO₂ liées à l'énergie étaient inférieures de 27 % en 2023 par rapport à 1990.

Tableau 11.1 Décomposition de Kaya pour la Suisse (1990-2050)².

					Facteurs de croissance	
		1990	2023	2050	1990-2023	2023-2050
Population	millions	6,7	8,9	10,1	1,32	1,14
PIB/hab.	kCHF	66,8	85,8	95,8	1,29	1,12
PIB	GCHF	448	763	968	1,70	1,27
Énergie/PIB	KJ/CHF	1 773	1 006	712	0,57	0,71
Énergie	PJ	795	767	689	0,97	0,90
CO ₂ /Énergie	t/TJ	51,6	39,2	5,9	0,76	0,15
CO ₂	Mt	41,0	30,1	4,0	0,73	0,13

NOTE : Il s'agit des émissions de CO₂ liées à l'énergie fossile et des francs de 2020.

La décomposition de Kaya permet également d'évaluer les efforts qui seront nécessaires pour atteindre l'objectif fixé par le Conseil fédéral de réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie de 30,1 Mt en 2023 à 4 Mt en 2050. Il est anticipé que la population et la prospérité économique continueront de croître, mais moins rapidement que ces trente dernières années. À eux deux, ces facteurs pourraient encore faire croître les émissions de CO₂ de 27 % par rapport à 2023 (tableau 11.1, colonne des facteurs de croissance). Les scénarios du Conseil fédéral prévoient que l'intensité énergétique du PIB diminue encore de 29 % d'ici à 2050. C'est moins que ces trente dernières années, car les mesures les plus faciles pour accroître l'efficacité énergétique ont déjà été prises et la désindustrialisation est déjà très avancée en Suisse. Ces 29 % de baisse, combinés avec les 27 % de croissance du PIB, conduisent à une diminution de 10 % de la consommation énergétique ($1,27 \times 0,71 = 0,90$), ce qui est insuffisant pour atteindre la réduction des émissions visée, de 87 % par rapport à 2023. Le Conseil fédéral compte donc sur une décarbonation presque complète de l'énergie, alors que l'intensité carbone de l'énergie n'a baissé que de 24 % entre 1990 et 2023. Concrètement, cela signifie remplacer tous les moteurs thermiques par des moteurs électriques et tous les systèmes de production de chaleur utilisant de l'énergie fossile par des alternatives qui n'en utilisent pas (biomasse, chaleur ambiante, etc.).

Le défi serait moindre si les facteurs 1 et 2 cessaient de croître, donc plus aucune croissance démographique ni économique (sobriété). La Suisse a connu une

diminution de sa population résidante et de son PIB après le premier choc pétrolier, en 1975. Cela a fait baisser les émissions de CO₂ pour la première fois. Un tel choc serait cependant douloureux et pourrait priver l'économie et les ménages des moyens nécessaires pour accroître l'efficacité énergétique et décarboner l'économie (facteurs 3 et 4 de l'identité de Kaya).

11.2 Leviers de la décarbonation

La décomposition des émissions de CO₂ liées à l'énergie selon l'identité de Kaya a montré les **leviers** possibles de la réduction de ces émissions. On peut reproduire ce genre de décomposition pour les principales sources d'émissions de CO₂ et d'autres GES, et identifier ainsi les leviers possibles pour réduire ces émissions. Par exemple, les émissions de CO₂ liées à l'habitat viennent principalement de l'utilisation d'énergie pour régler le climat intérieur des logements. On peut donc décomposer ainsi³ :

$$\begin{aligned} & \text{Émissions de CO}_2 \text{ pour habitat} \\ &= \text{Population} \times \frac{\text{m}^2 \text{ habitat}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Énergie habitat}}{\text{m}^2 \text{ habitat}} \times \frac{\text{CO}_2 \text{ habitat}}{\text{Énergie habitat}} \end{aligned}$$

Le levier démographique est évident mais il ne faut pas exagérer son potentiel. On ne va pas freiner la démographie juste pour réduire les émissions de CO₂ liées à l'habitat. La portée de ce premier levier est évidemment limitée : il ne permettra jamais de réduire les émissions à zéro. Enfin, il est possible d'accueillir bien plus de personnes dans notre parc de logements actuel sans l'agrandir. Cela aurait pour effet de faire baisser la surface d'habitat par personne. L'autre manière d'actionner ce deuxième levier consisterait à abandonner des bâtiments pour ne plus avoir à les chauffer, en priorité bien sûr les bâtiments particulièrement inefficaces sur le plan énergétique. Le fait de réduire notre confort pour réduire notre impact environnemental est souvent appelé **sobriété**. Dans les faits, mieux « remplir » le parc de logements existant et se limiter à chauffer le nombre nécessaire de bâtiments peut aussi être compris comme une mesure d'**efficacité**.

La mesure d'efficacité classique consiste à réduire l'énergie utilisée pour régler le climat intérieur d'une même surface de logement, le troisième levier. Cela passe par une meilleure isolation thermique des bâtiments, un meilleur réglage du système de chauffage, mais aussi par une température acceptée plus faible en hiver et plus élevée en été. Ces dernières mesures peuvent également être interprétées comme des mesures de sobriété. Certains bâtiments exceptionnellement performants peuvent produire eux-mêmes toute l'énergie dont ils ont besoin, mais en général, on ne compte pas réduire à zéro la consommation d'énergie des bâtiments. On a donc besoin du dernier levier pour éliminer les émissions de CO₂ des bâtiments : la **substitution**, c'est-à-dire le remplacement des formes d'énergie dont l'utilisation (la combustion) dégage du CO₂ par celles qui n'ont pas ce défaut.

Levier de la sobriété

Le levier de la sobriété, c'est l'injonction de « vivre mieux avec moins », de se contenter du nécessaire et de renoncer au superflu (dès lors, on l'appelle aussi *suffisance*). Lorsque c'est possible, on parvient à réduire son empreinte environnementale sans nuire à sa qualité de vie. À l'échelle individuelle, la sobriété est à distinguer de la renonciation sous contrainte ou par suite d'une incitation. On est sobre en renonçant aux voyages en avion principalement pour éviter de contribuer aux impacts de ce moyen de transport sur l'environnement, et non pas par manque de moyens, de temps ou d'autorisation, par peur de l'avion ou parce que l'on reçoit une compensation financière pour ce renoncement.

La sobriété est plus efficace lorsqu'elle conduit à réduire sa consommation des produits les plus nuisibles pour le climat, comme les voyages en avion, les véhicules gourmands en énergie, la viande, les appareils et machines (partager plutôt que posséder), les applications informatiques gourmandes en électricité (streaming, IA, monnaies crypto), etc. L'impact climatique du franc dépensé est généralement plus faible s'il est utilisé pour acheter des services plutôt que des biens produits, mais les voyages en avion font exception à cette règle.

Cela ne concerne pas uniquement les consommatrices et consommateurs. Le secteur public et les entreprises peuvent aussi faire preuve de sobriété. Cela passe par une réorganisation de nos économies et institutions pour qu'elles puissent se passer de croissance économique (marchés financiers, budgets publics, plans de retraites, etc.). En effet, diverses études⁴ montrent que même en adoptant tous les gestes de sobriété et d'efficacité à leur portée, les consommatrices et consommateurs ne peuvent pas éliminer plus de la moitié des émissions de GES. Le reste vient des institutions communes : agriculture, industrie, transports, secteur public (écoles, hôpitaux, armées), dont les émissions baissent mais ne disparaissent pas quand les ménages consomment moins de biens, de services et d'énergie. Les responsables de ces institutions doivent aussi prendre des mesures pour réduire leurs impacts sur le climat.

Levier de l'efficacité

Alors que la sobriété est souvent perçue comme un sacrifice, l'efficacité est la promesse de maintenir les mêmes modes de consommation et d'activités tout en réduisant leurs impacts environnementaux. Il s'agit d'abord de réduire les pertes et gaspillages. Ensuite, il s'agit d'obtenir les mêmes services avec moins de ressources ou d'impact environnemental. En effet, l'efficacité est mesurée par la quantité de service obtenue pour une quantité de ressource (énergie) ou d'impact environnemental (émissions de CO₂). Par exemple, la distance qu'on peut parcourir en voiture avec un litre de carburant mesure l'efficacité énergétique de cette voiture. L'efficacité est l'inverse de l'*intensité*. La consommation d'une voiture pour 100 km mesure l'intensité énergétique des déplacements avec celle-ci.

Plus la définition de service à optimiser est large, plus on dispose de possibilités d'augmenter son efficacité. Considérons, par exemple, les déplacements pendulaires en voiture et leurs émissions de CO₂.

- Si le service est défini comme la possibilité de se rendre tous les jours ouvrables à son travail avec sa voiture à moteur thermique actuelle, alors la seule façon de le faire avec moins d'émissions est de conduire de manière à minimiser la consommation de la voiture.
- Si le service est défini comme la possibilité de se rendre tous les jours ouvrables à son travail en voiture, alors on peut le faire avec une voiture plus économe, voire électrique.
- Si le service est défini comme la possibilité de se rendre tous les jours ouvrables à son travail, alors on peut le faire en autopartage, en transport en commun ou à vélo.
- Si le service est défini comme la possibilité de faire son travail, alors s'ajoutent les options du télétravail et du rapprochement de son domicile vers son lieu de travail.

L'exemple montre que pour accroître l'efficacité d'un service, une innovation technique n'est pas toujours nécessaire. Il montre également que les gains d'efficacité ne sont pas toujours gratuits. Les coûts peuvent être matériels (les transports en commun ou la voiture électrique sont plus onéreux) et immatériels (moins de confort, un temps de parcours plus long, une perte de flexibilité). Ces coûts expliquent pourquoi ces solutions d'efficacité ne sont pas toujours adoptées.

Pourtant, les mesures d'efficacité ont le potentiel de ne pas coûter si cher, voire de permettre des économies. Après tout, la réduction de la consommation de ressources qu'elles impliquent représente une économie. La voiture électrique est plus coûteuse à l'achat, mais les frais d'énergie et d'entretien sont plus faibles. Un modèle de voiture consommant moins d'énergie parce qu'il est moins grand et plus léger permet même de réaliser des économies sur tous les tableaux. Mieux isoler sa maison coûte, mais permet de faire des économies sur ses frais de chauffage. Or, ces économies vont justement annuler une partie du potentiel d'efficacité à travers l'*effet rebond*.

L'effet rebond remet en question la contribution possible du *progrès technique* à la réduction des émissions de GES. Dans les termes de l'identité de Kaya, la diminution de l'intensité énergétique devrait déjà compenser la croissance démographique et économique, mais si, en plus, elle stimule l'activité économique par effet rebond, cela devient très difficile. Le problème est bien illustré par l'évolution du transport aérien mondial entre 1990 et 2010. Sur ces vingt ans, l'optimisation des avions et de leurs moteurs ainsi que leur meilleur remplissage ont permis de réduire la consommation de kérosène par personne \times km⁵ de 60 % ; malgré cela, la consommation de kérosène a augmenté de 40 %. Pourquoi ? Parce que le nombre de personnes \times km

a augmenté de 250 %⁶. Cette augmentation reflète celle de la population mondiale (+ 31 %) et celle du revenu moyen par personne (+ 37 %), mais surtout aussi le fait que la baisse de la consommation de kérosène, qui est un facteur de coût important, a permis de réduire le prix des billets et de rendre l'avion accessible à un bien plus grand nombre de personnes.

Encadré 11.1 Qu'est-ce que l'effet rebond ?

En économie, l'effet rebond est associé au déploiement de nouvelles technologies qui devraient permettre d'obtenir la même production ou le même service avec moins de ressources (énergie, matière). Prenons l'exemple d'une voiture qui permet de parcourir la même distance avec 20 % de carburant en moins. Comme elle nécessite moins d'énergie, elle coûte moins cher à l'usage. Sa propriétaire pourrait en profiter pour l'utiliser davantage. Sa consommation de carburant diminuerait donc de moins de 20 %. La différence entre la baisse potentielle et la baisse effective est l'effet rebond.

L'effet rebond passe par divers canaux liés à la réponse des acteurs économiques au potentiel d'économies rendu possible par la technologie d'efficacité. Par exemple, pour les mesures d'efficacité énergétiques :

- l'efficacité accrue d'une voiture, d'une maison mieux isolée, d'un appareil électrique réduit son coût d'usage, donc la personne qui en est propriétaire l'utilise davantage ;
- grâce à la baisse des coûts d'usage, plus de personnes peuvent acheter une voiture, une maison ou des appareils électriques, et elles peuvent choisir un modèle plus grand ;
- les ménages dépensent les frais d'énergie économisés grâce aux mesures d'efficacité pour acheter d'autres biens et services, dont la production et l'utilisation consomment de l'énergie ;
- les mesures d'efficacité dans le domaine de la production de biens et services réduisent les coûts de ces productions, donc ces biens et services se vendront en plus grandes quantités (par exemple, les voyages en avion avec des avions plus efficaces).

Quand on pense aux efforts et aux investissements déployés pour optimiser les avions, et de façon générale pour accroître l'efficacité de nos machines et infrastructures, on voit bien qu'il faut les accompagner de mesures agissant sur la demande pour qu'ils contribuent complètement à la décarbonation. C'est d'autant plus nécessaire que les entreprises qui investissent dans l'efficacité énergétique le font justement pour accroître leurs ventes.

Levier de la substitution

Si l'on pouvait simplement remplacer les énergies fossiles par des énergies ne produisant pas de GES, il serait possible de réduire les émissions de CO₂ liées à l'énergie à zéro sans rien devoir changer d'autre. C'est le projet des voitures électriques et le rêve des « carburants d'aviation durables ». Le simple remplacement du charbon par du pétrole permet déjà de réduire de 30 % les émissions de CO₂ dans la production d'électricité, et même de 60 % avec un passage au gaz naturel⁷. Le nucléaire et les énergies renouvelables permettent d'annuler presque entièrement ces émissions, mais présentent d'autres inconvénients : utilisation de matières premières, déchets, risques et coûts.

De façon générale, le remplacement d'énergies, de matières ou d'aliments émetteurs de GES par d'autres qui en émettent moins ou pas du tout s'accompagne de désagréments, d'autres impacts environnementaux, et surtout de limites physiques et économiques. Cela freine la substitution. De plus, il a été observé que les nouvelles solutions moins émettrices de GES ne remplacent souvent pas les autres, mais s'y ajoutent. Ainsi, la consommation mondiale de charbon n'a jamais été aussi élevée qu'en 2024⁸, en même temps que la production mondiale d'énergie renouvelable atteignait un nouveau record. Là encore, il serait naïf d'espérer que les acteurs économiques profitent des nouvelles solutions techniques moins polluantes pour se débarrasser des anciennes, plus polluantes.

En résumé, chaque levier de l'identité de Kaya doit être actionné, surtout pour limiter le réchauffement à 1,5 °C ou 2 °C, en sachant qu'il y a des freins partout et que les espoirs mis dans ces leviers sont souvent déçus, particulièrement ceux qui portent sur le progrès technique. Nos systèmes économiques évoluent continuellement, parfois pour rendre des activités moins polluantes, mais les progrès obtenus jusqu'à présent n'ont pas suffi à réduire les émissions globales de GES. Il faut des actions politiques pour faire bouger les leviers et pour s'assurer que les améliorations possibles soient bien réalisées. Voyons maintenant ce qui a été fait en Suisse dans ce sens.

11.3 Les instruments de la politique climatique suisse

Dans une économie et une société libérales comme celles de la Suisse, les autorités ne peuvent pas simplement imposer des pratiques économiques et des modes de vie qui seraient moins nuisibles au climat. Elles peuvent seulement créer des conditions favorables, encourager et parfois, sous certaines conditions assez strictes, prescrire ou interdire. Elles disposent d'une variété d'instruments, présentée dans le tableau 11.2, des moins aux plus contraignants.

Tableau 11.2 Moyens d'actionner les leviers de la décarbonation⁹.

Familles d'instruments	Exemples
Informar, encourager	Campagnes, labels
Faciliter	Services publics, recherche
Inciter financièrement	Subventions
Exercer une pression économique	Taxes, quotas échangeables
Prescrire, soumettre à autorisation, interdire	Normes, exclusions du marché, valeur limites, conventions d'objectifs, feuilles de route

Pour atteindre son premier objectif en matière d'émissions de GES, à savoir la stabilisation des émissions de CO₂ en 2000 par rapport à 1990 (voir section 12.1), la Confédération et en partie les cantons ont misé sur l'information et des campagnes encourageant à l'économie d'énergie. Des prescriptions concernant l'efficacité énergétique minimale des nouveaux bâtiments avaient déjà été introduites par les cantons dans les années 1980, puis progressivement renforcées. En janvier 1996, la Confédération a mis en œuvre une ordonnance sur la consommation spécifique des automobiles, avec des valeurs cibles de consommation pour les voitures neuves. Cependant, elle comptait sur le bon vouloir des importateurs qui n'ont jamais réussi à respecter les objectifs annuels.

Combustibles (bâtiments et industrie)

La première loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ de 1999 (loi sur le CO₂, RS 641.71) a permis d'introduire en 2008 une **taxe sur le CO₂**. Il s'agit d'une **taxe d'incitation**, qui vise donc à influencer les comportements plutôt qu'à produire une recette comme le ferait un impôt. En l'occurrence, elle renchérit les combustibles fossiles (charbon, huile de chauffage, gaz naturel) utilisés pour chauffer les bâtiments, produire de l'eau chaude, ou dans les processus industriels, afin d'encourager à les utiliser avec modération et à les remplacer aussitôt que possible. La taxe est prélevée sur ces combustibles au prorata de leur contenu en carbone, et donc des émissions de CO₂ résultant de leur combustion. Le taux de la taxe, fixé initialement à 12 francs par tonne de CO₂, a été progressivement augmenté jusqu'à 120 francs en 2022 pour atteindre les objectifs intermédiaires de baisse des émissions de CO₂. Depuis, le Parlement fédéral n'envisage plus d'augmenter la taxe¹⁰ alors que ce serait nécessaire pour accélérer la réduction des émissions.

Même si ce n'est pas là son objectif, la taxe produit une **recette** qui s'élevait à quelque 220 millions de francs en 2008 et qui a atteint 1,3 milliard en 2022. Un tiers de cette recette est redistribué à la population sous la forme d'un montant fixe par personne, versé *via* les assurances maladie (61,80 francs en 2025). Un tiers est redistribué aux entreprises au prorata de leur masse salariale. Le dernier tiers est affecté au Programme bâtiments, qui permet aux cantons de subventionner la rénovation énergétique des bâtiments ainsi que la construction de bâtiments à haute performance énergétique.

Toutes les émissions de CO₂ ne sont pas soumises à la taxe sur le CO₂. Comme le produit de la taxe est égal au volume des émissions de CO₂ soumises à la taxe multiplié par son taux, on peut estimer ce volume en divisant chaque année le produit de la taxe par le taux qui s'appliquait cette année-là. On constate ainsi qu'il ne s'agissait que d'environ 40 % des émissions entre 2008 et 2022, et plutôt de 30 % depuis. Cela est dû d'abord au fait que les carburants fossiles, principalement l'essence et le diesel pour les véhicules, ne sont pas soumis à la taxe. Ensuite, les entreprises qui devraient payer une taxe très élevée par rapport à leur chiffre d'affaires étaient exemptées si elles s'engageaient à réduire leurs émissions dans la même proportion que si elles devaient payer la taxe. Cette possibilité a été étendue à toutes les entreprises en 2025. Enfin, les quelque cinquante plus grandes émettrices de CO₂ sont exemptées de la taxe en échange de leur participation au système d'échange de quotas d'émissions.

Une taxe sur le CO₂ garantit un prix plus élevé pour les vecteurs énergétiques taxés qu'en l'absence de taxe, mais elle ne garantit pas une augmentation de leur prix d'une année à la suivante, même si le taux de la taxe augmente. Ainsi, le prix moyen du litre de mazout (huile de chauffage extra-légère), qui était de 109,6 centimes en 2008, dont 3,42 centimes de taxe sur le CO₂ (correspondant à 12 francs/tonne CO₂), a oscillé entre 69 et 104 centimes entre 2009 et 2021, alors même que la taxe augmentait graduellement pour atteindre 27,40 centimes (96 francs/tonne CO₂). Ce n'est qu'en 2022, lorsque le prix du pétrole a flambé en raison de la guerre en Ukraine, que le prix du litre de mazout a dépassé son niveau de 2008 pour les propriétaires d'immeubles en Suisse. Ainsi, l'effet incitatif de la taxe sur le CO₂ a été partiellement neutralisé par la variation du prix du brut.

Avec 120 francs par tonne, le taux de la taxe sur le CO₂ suisse est élevé en comparaison internationale, mais comme elle ne porte que sur une partie des émissions, son impact n'est pas plus important que celui d'instruments similaires à taux plus faible mais assiette plus large utilisés par d'autres pays, notamment de l'UE.

L'UE ne connaît d'ailleurs pas de taxe sur le CO₂ commune, mais utilise à la place un système d'échange de quotas d'émissions pour les grands émetteurs, que les grands émetteurs suisses ont rejoint en 2020. Le prix que ces émetteurs doivent payer par quota, qui leur donne le droit d'émettre une tonne de CO₂, a le même effet incitatif qu'une taxe sur le CO₂ au même taux. En revanche, dans la mesure où une partie des quotas sont distribués gratuitement, le fardeau financier est plus léger. Le prix des quotas est longtemps resté très faible, inférieur à 20 euros par tonne de CO₂, parce que l'UE en a distribué beaucoup trop¹¹. Ce n'est que depuis la fin 2021 que ce prix oscille entre 60 et 100 euros, ce qui reste bien inférieur au taux de la taxe sur le CO₂ suisse.

Carburants (transports)

Le secteur des transports a toujours réussi à éviter des exigences et mesures comparables à celles qui s'appliquent aux bâtiments et à l'industrie¹². Les premières mesures relevaient du volontariat, puisque la Confédération s'est limitée à promouvoir des

modes de conduite plus économes (*EcoDrive*), le covoiturage (*car sharing*), les agro-carburants, le choix de voitures plus économes au moyen de l'étiquette-énergie, et les transports en commun¹³. Lorsque la taxe sur le CO₂ a été introduite en 2008, l'association des importateurs de produits pétroliers a réussi à éviter qu'elle s'applique aux carburants en s'engageant à prélever à la place un à deux centimes par litre d'essence et de diesel vendu, juste assez pour financer des réductions d'émissions dans d'autres domaines et acheter des certificats à l'étranger. Le secteur compense ainsi une partie de ses émissions. Ce taux de compensation augmente progressivement (23 % à partir de 2024), ce qui a requis une augmentation du prélèvement à 8 centimes par litre. Par ailleurs, on compte sur la fondation Klik, chargée de gérer l'utilisation de ce prélèvement, pour organiser et financer les compensations à l'étranger des émissions que la Suisse ne réussit pas à réduire sur son territoire.

Augmenter (légèrement) les carburants est un moyen d'encourager le secteur des transports à réduire ses émissions. L'autre solution consiste à inciter le secteur à passer à des véhicules moins émetteurs, que ce soient des véhicules utilisant moins de carburant ou des véhicules hybrides ou entièrement électriques. Pour encourager cette évolution, la Confédération fixe, depuis 2015, une valeur limite aux émissions des voitures mises en circulation : 130 g de CO₂/km à partir de 2015 et jusqu'en 2019, puis une diminution jusqu'à 95 g, limite redéfinie à 118 g quand le mode de calcul des émissions théoriques a été remplacé puis abaissée à 93,6 g depuis le 1^{er} janvier 2025¹⁴. Des valeurs limites sont dorénavant aussi imposées pour les véhicules utilitaires légers et lourds.

Ces limites, presque directement reprises des directives européennes, ne s'appliquent qu'aux nouveaux véhicules. Avec un taux de remplacement des voitures de quelque 6 % par an, il faudra environ quinze ans pour que l'ensemble du parc soit au nouveau standard¹⁵. De plus, le mode de calcul des émissions théoriques pendant la procédure d'homologation, même amélioré, reflète mal la réalité du trafic routier. Enfin, l'application de la règle est souple, puisque ce sont seulement les émissions moyennes par importateur qui doivent respecter la limite, et non chaque véhicule. Ainsi, un importateur vendant une voiture électrique peut vendre une voiture émettant le double de la limite sans pénalité. Malgré cette souplesse, les limites sont généralement dépassées et les importateurs paient des sanctions¹⁶.

La recherche a permis de rendre les moteurs de plus en plus performants, bien plus que ce que suggère la baisse de la consommation spécifique des voitures. En effet, une bonne partie du gain potentiel est perdue par des voitures devenant de plus en plus lourdes, notamment, mais pas seulement à cause du poids des équipements de sécurité, et de plus en plus puissantes (effet rebond)¹⁷.

Avec le durcissement très graduel des exigences et les progrès techniques en grande partie annulés par l'effet rebond (véhicules plus lourds), les émissions moyennes par kilomètre des voitures en circulation ne diminuent que lentement, passant de 233 g en 1990 à 180 g en 2023¹⁸. Comme le total des kilomètres parcourus par une population croissante ne diminue guère, les émissions de CO₂ des

voitures de tourisme ne baissent que depuis 2011. En 2023, elles étaient 2 % en dessous du niveau de 1990.

Compensation internationale

Sous certaines conditions, un pays peut remplir ses obligations d'atténuation par compensation, c'est-à-dire en rendant possible la réalisation de mesures d'atténuation dans d'autres pays, *via* le financement de projets de réduction des émissions, d'économie d'énergie ou de capture et séquestration du CO₂. En pratique, ce financement se fait par l'achat de « crédits carbone » qui sont émis par les projets et peuvent être achetés soit dans le cadre d'accords bilatéraux, soit sur un marché des crédits carbone. Cette possibilité a été introduite par le protocole de Kyoto (1997) en tant que mécanisme de coopération internationale (voir section 9.2, « L'accord de Paris »). Elle repose sur le constat qu'éviter d'émettre une tonne de CO₂ en Suisse ou au Pérou¹⁹, par exemple, a exactement le même effet pour le climat. S'il est possible d'éviter d'émettre cette tonne à un coût plus faible en énergie, ressources et main-d'œuvre au Pérou qu'en Suisse, il semble à première vue préférable de le faire au Pérou. Les entreprises suisses et même le gouvernement utilisent donc très volontiers cette possibilité.

En réalité, c'est le prix à payer, plus faible au Pérou (ou dans de nombreux autres pays moins industrialisés), qui incite les émetteurs suisses à opter pour des mesures d'atténuation dans ce pays plutôt que réduire leurs propres émissions. Or, le prix ne reflète pas nécessairement la quantité d'énergie, de ressources et de main-d'œuvre nécessaires pour éviter d'émettre 1 tonne de CO₂, surtout dans le cadre de comparaisons internationales. Le prix reflète encore moins les impacts sociaux et environnementaux, positifs et négatifs, engendrés par la mesure d'atténuation²⁰.

Il existe encore un risque élevé que la mesure de compensation ne compense pas réellement les émissions qui n'auront pas été réduites en Suisse. En effet, pour qu'une tonne de CO₂ émise en Suisse puisse être compensée par une tonne de CO₂ évitée au Pérou, il faut que le financement apporté par l'organisation responsable de l'émission en Suisse soit effectivement à l'origine d'une véritable réduction au Pérou. Ce n'est pas le cas si le projet financé par l'émetteur suisse ne produit pas les effets annoncés, ou seulement temporairement (par exemple, la plantation d'un arbre permet l'absorption et le stockage de CO₂ durant sa croissance, mais celui-ci sera libéré dans l'atmosphère si l'arbre brûle ou quand il se décomposera). Il n'y a pas non plus de compensation si le projet ne nécessitait pas le financement suisse. Cette condition d'additionnalité est très difficile à prouver, puisqu'il faut démontrer que le projet n'aurait pas eu lieu de toute façon, pour des raisons économiques ou autres, en l'absence du financement suisse. Il arrive d'ailleurs souvent que des réductions d'émissions soient comptabilisées deux fois, par le pays où elles ont lieu et par le pays qui les finance. Enfin, il ne faut pas que les émissions soient reportées ailleurs, par exemple que le charbon qui n'est plus incinéré dans telle centrale électrique fermée avec un financement compensatoire suisse soit incinéré ailleurs.

Pour garantir l'intégrité des projets de compensation, ceux-ci doivent faire l'objet d'une vérification minutieuse par un organisme indépendant. Malheureusement, toutes les parties prenantes – l'instance péruvienne responsable du projet, l'entreprise suisse qui souhaite la reconnaissance du projet et l'entreprise chargée de l'audit – ont intérêt à ce que cette vérification soit superficielle afin de réduire les coûts. Il n'est donc pas surprenant que la vérification par des organismes véritablement indépendants ait démontré que la plupart des projets de compensation ne satisfont pas aux exigences et ne produisent pas les réductions d'émissions escomptées²¹. Compter sur la compensation pour atteindre ses objectifs climatiques est donc une solution de facilité, mais elle présente un risque élevé.

Au fil des années, il deviendra de plus en plus difficile de justifier des compensations à l'étranger, puisque tous les pays devront avoir réduit leurs émissions à zéro vers le milieu du siècle. Dans ces conditions, les projets ne peuvent plus être additionnels, sauf à les réaliser dans les pays qui tardent le plus à prendre leurs propres mesures pour réduire les émissions, ce qui revient à les récompenser pour leur manque d'ambition. Pour les pays qui ont recours aux compensations à l'étranger, cela revient à reporter une décarbonation qu'ils devront de toute façon réaliser, tout en renonçant aux cobénéfices d'une décarbonation rapide.

Autres secteurs et conclusions

La politique climatique est soutenue par d'autres politiques dans de nombreux domaines : l'énergie (par exemple, la promotion de l'électricité renouvelable et des agrocarburants), la construction (par exemple, les prescriptions relatives à l'isolation des nouveaux bâtiments), les transports (par exemple, les transports en commun et la redevance poids lourds liée aux prestations), les déchets (par exemple, la valorisation des rejets de chaleur), les forêts (par exemple, la promotion de l'utilisation du bois et la reforestation), l'agriculture (par exemple, les paiements directs pour des pratiques moins émettrices de GES), la chimie (par exemple, les restrictions concernant l'utilisation de réfrigérants et d'isolants à fort impact climatique)²². Ces mesures n'ont pas toujours eu pour objectif principal la réduction des émissions de GES.

On voit donc que pour actionner les leviers permettant de diminuer les émissions de GES, les autorités disposent de et ont utilisé une multitude d'instruments, y compris dans d'autres domaines. Cependant, rien ne garantit que les réductions d'émissions aient été obtenues là où c'était possible à moindre coût et avec les solutions les plus avantageuses. Plus de 60 % de la diminution des émissions de CO₂ depuis 1990 a été obtenue dans le chauffage des bâtiments (logements et services), qui était responsable de 39 % des émissions en 1990 (figure 12.1), alors que l'isolation des bâtiments est une opération relativement coûteuse. La répartition des efforts de réduction d'émissions reflète plutôt des choix politiques et la capacité relative des différents secteurs à freiner les changements.

12. Objectifs et résultats de la politique climatique suisse

Après avoir présenté les principaux instruments de la politique climatique suisse, il convient désormais de vérifier les résultats obtenus grâce à ces instruments et de les comparer aux objectifs que le pays s'est fixés pour contribuer à limiter le réchauffement climatique. C'est l'occasion de s'interroger sur ces derniers. En effet, il est plus facile d'atteindre des objectifs peu ambitieux. Le pire est de se fixer des objectifs peu ambitieux et de ne pas les atteindre.

12.1 Émissions de CO₂ et objectifs de la Suisse

Les émissions de CO₂ de la Suisse ont été reconstruites depuis 1858 par l'équipe du Global Carbon Project en utilisant les importations d'énergies fossiles (principalement le charbon jusqu'en 1957, puis le pétrole et ses dérivés, plus tard encore le gaz naturel) et la production de ciment estimées ou recensées par différentes sources¹. Nous nous intéresserons aux émissions depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, au début des « Trente Glorieuses », les trois décennies de forte croissance économique.

Les émissions de CO₂ ont augmenté de façon presque ininterrompue de 1,6 million de tonnes en 1945 à un maximum de 46,2 millions de tonnes en 1973. Puis, soudain, la croissance s'est arrêtée et les émissions ont juste oscillé entre 36 et 42 millions de tonnes jusqu'en 1990. Que s'est-il passé en 1973 ? Le **premier choc pétrolier**, lorsque le prix du baril de pétrole est passé de moins de 2 dollars (US) avant 1973 à 11 dollars dès 1974². Cela a suffi pour provoquer une récession économique en Suisse : le PIB a diminué de 6,4 % entre 1973 et 1975 et le nombre de personnes à la recherche d'un emploi est passé de 183 à 21 732.

Cette récession a marqué la fin de la croissance de l'utilisation des produits dérivés du pétrole. La multiplication du prix du baril par cinq a déclenché les premiers efforts pour limiter leur consommation. D'autant plus que le prix du baril a encore bondi à 30 dollars lors du deuxième choc pétrolier en 1979. Ces chocs successifs ont renforcé la volonté de la Suisse de réduire sa dépendance aux importations d'énergie fossile, ce qui a motivé les premiers programmes nationaux d'économie d'énergie.

La prise de conscience du danger climatique est intervenue plus tard. Elle a conduit à l'objectif de stabilisation des émissions de CO₂ dès 1990. Un objectif peu ambitieux, étant donné qu'elles étaient déjà stabilisées depuis près de deux décennies. Pour comprendre ce qu'il implique, il faut examiner les principales sources de CO₂ en 1990, mais aussi les autres GES.

Si le CO₂ n'est pas le seul GES, c'est de loin le plus important, correspondant à 81 % des émissions en Suisse en 1990 (tableau 12.1). Tout le CO₂ n'est pas émis par l'utilisation d'énergies fossiles, mais celles-ci sont bien responsables de 74 % des émissions de GES. On comprend, dès lors, que la politique climatique a initialement mis l'essentiel des efforts sur le CO₂ d'origine énergétique. Conformément aux accords internationaux, les pays sont responsables des émissions sur leur territoire (« Émissions domestiques » dans le tableau). Les émissions liées au transport aérien et maritime international sont recensées, mais pas prises en compte dans les objectifs nationaux. Les émissions de GES hors du pays liées à la production des produits importés ou aux investissements contrôlés depuis la Suisse ne sont même pas intégrées dans l'inventaire.

Tableau 12.1 Émissions de GES de la Suisse en 1990 – par type et sources principales (% des émissions totales)³.

	Dioxyde de carbone (CO ₂)	Méthane (CH ₄)	Protoxyde d'azote (N ₂ O)	Gaz synthétiques (HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃)	Total
Énergie	72,2	1,1	0,6	0,0	74,0
Processus industriels et solvants	6,1	0,0	1,1	0,4	7,5
Agriculture	0,1	7,4	4,1	0,0	12,0
Déchets	0,1	1,7	2,3	0,0	4,0
Autres	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Émissions domestiques totales	78,6	10,2	8,0	0,4	97,6
Transport aérien international	5,4	0,0	0,0	0,0	5,4
Transport maritime international	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Lulucf	– 3,3	0,0	0,1	0,0	– 3,1
Émissions nettes	80,8	10,3	8,1	0,4	100,0

NOTE : Les émissions de tous les GES ont été converties en équivalents CO₂. Lulucf = Land use, land use change and forestry. En italique : totaux.

En 1990, les transports (voitures et poids lourds), les ménages (chauffage et production d'eau chaude pour l'habitat) et l'industrie étaient responsables de l'essentiel des émissions de CO₂ en Suisse (figure 12.1). Dans les textes légaux, l'énergie utilisée pour les transports est appelée *carburants* et celle qui est utilisée pour la production de chaleur et les processus industriels est appelée *combustibles*. Dans la figure 12.1, « Autres » comprend l'agriculture. Vu sa faible part aux émissions de CO₂, elle n'est pas prioritaire dans la politique climatique, mais elle va le devenir pour ses émissions de méthane (tableau 12.1) et pour sa contribution au stockage de CO₂. La conversion d'énergie, soit principalement la production d'électricité, est responsable d'une part beaucoup plus importante d'émissions dans les pays qui utilisent des énergies fossiles pour cela. En Suisse, elle ne représentait, en 1990, que 2,6 % des émissions totales de CO₂.

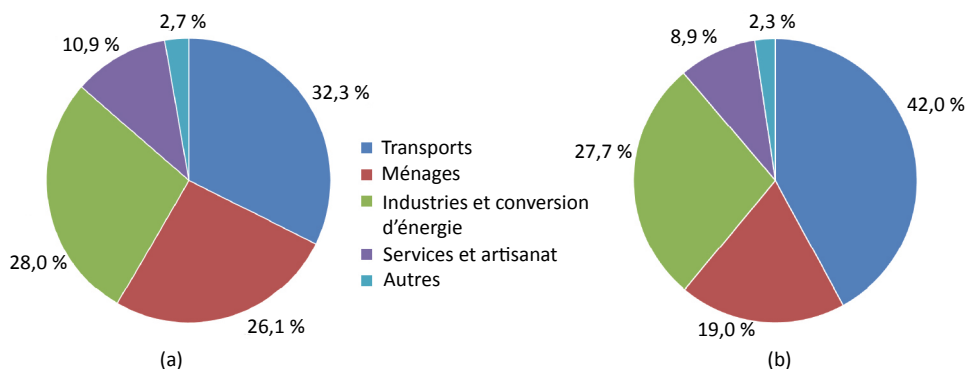


Fig. 12.1 Parts des différents secteurs aux émissions totales de CO₂ en (a) 1990 et (b) 2023⁴.

1990 est l'*année de référence* pour fixer les objectifs de réduction des émissions et mesurer la performance, en Suisse et dans la plupart des pays participant aux accords internationaux. En 1990, les émissions de CO₂ s'élevaient à 44,5 millions de tonnes, dont 41 étaient liées à l'énergie. En ajoutant les autres principaux GES en équivalents CO₂, le total était de 55,3. Entre 1990 et 2000, les émissions de CO₂ sont restées relativement constantes, si bien que l'objectif de stabilisation a été atteint⁵.

En 1999, le Parlement fédéral approuvait la première *loi sur le CO₂*. Celle-ci contenait des objectifs de réduction des émissions de CO₂ compatibles avec l'engagement que la Suisse avait pris en signant le protocole de Kyoto : la réduction des émissions de CO₂ de 10 % et la stabilisation des émissions des autres GES, de façon à obtenir ensemble une réduction des émissions de GES de 8 % en moyenne sur la période 2008-2012 par rapport à 1990. La loi précisait même des objectifs distincts pour les carburants (moins 8 %) et les combustibles (moins 15 %). L'objectif a été presque atteint pour les combustibles, surtout grâce aux efforts dans le domaine du chauffage. Il a été complètement manqué pour les carburants, puisque leurs émissions ont effectivement augmenté de 13 %. En revanche, un prélèvement de 1,5 centime par litre d'essence ou de diesel a permis aux importateurs et distributeurs de carburants d'acheter à l'étranger des certificats de réduction que le Conseil fédéral a inclus dans ses calculs, sans quoi il n'aurait pas rempli son engagement de Kyoto.

En 2011, le Parlement fédéral approuvait une nouvelle loi sur le CO₂. Les 17 articles de la première loi étaient remplacés par 50 articles. Surtout, la nouvelle loi fixait des objectifs de réduction pour l'ensemble des GES et par secteur, à atteindre en 2020 toujours par rapport à 1990 : 40 % de réduction pour les bâtiments, 10 % pour les transports, 15 % pour l'industrie et 10 % pour les autres sources, principalement l'agriculture et l'incinération des déchets. Ces objectifs, portant sur la seule année 2020, ont été atteints « grâce » au confinement partiel de la population du 20 mars 2020 jusqu'au milieu de l'année et à un hiver très doux. Sur l'année, les émissions de GES étaient inférieures de 20,6 % à celles de 1990, alors que l'objectif était de moins 20 %. En 2021, les émissions repartaient à la hausse.

Comme évoqué plus haut, ces objectifs ne concernent que les émissions sur le territoire suisse. Les émissions du transport aérien international au départ des aéroports suisses ont dépassé de 53 % en 2023 le niveau de 1990⁶. La Suisse importe plus de la moitié de sa consommation de nourriture et de fourrage et beaucoup plus de produits manufacturés qu'elle n'en exporte. En effet, la part de l'emploi dans le secteur industriel diminue continuellement, à seulement 24 % en 2023, alors que les produits de ce secteur représentent 56 % des dépenses des ménages⁷. Aux émissions agricoles et industrielles s'ajoutent les émissions de GES causées par l'extraction, le transport et le raffinage des énergies fossiles que la Suisse importe intégralement. Tout compte fait, ces émissions extraterritoriales pour la Suisse sont deux fois plus importantes que les émissions territoriales⁸. Comme elles ne diminuent pratiquement pas, l'empreinte GES de la Suisse, qui additionne les émissions domestiques et extraterritoriales, n'a baissé que de 9 % entre 2000 et 2021.

12.2 Perspectives

Selon certains calculs, la part équitable de la Suisse à un **budget carbone** mondial compatible avec un réchauffement limité à 1,5 °C avec deux tiers de probabilité s'élevait, au début de l'année 2024, à 150 millions de tonnes de CO₂⁹. De 2018 à 2023, les émissions en Suisse ont baissé de 37 à 32 MtCO₂, pour un total de 210 MtCO₂ pour ces six années. En prolongeant cette série avec la diminution moyenne observée d'année en année, le budget de 150 millions de tonnes sera épuisé en 2028.

Que prévoit la **stratégie climatique** de la Suisse ? Dans un premier temps, l'ordonnance accompagnant la nouvelle loi sur le CO₂, qui aurait dû remplacer celle de 2011 dès 2021 mais qui n'est entrée en vigueur qu'au 1^{er} janvier 2025, prévoit une diminution des émissions territoriales de GES de 33 % en 2030 par rapport à 1990. Les émissions resteraient ainsi sur la trajectoire entamée en 2010, avec une diminution de l'ordre de 1 % des émissions de 2010 chaque année. À ce rythme, les émissions seront nulles en 2110.

Pourtant, le Parlement fédéral a ratifié l'accord de Paris sur le climat en juin 2017 et engagé ainsi la Suisse à réduire de 50 % ses émissions de GES d'ici à 2030 par rapport à 1990. La différence entre cet engagement et l'objectif de la nouvelle loi sur le CO₂ doit être comblée par l'achat de certificats étrangers, principalement financé par un prélèvement sur les ventes d'essence et de diesel qui atteint dorénavant 8 centimes par litre¹⁰.

Pour ce qui est de l'avenir au-delà de 2030, le Conseil fédéral a fixé en 2019 un objectif de **neutralité carbone** dès 2050 en se référant aux derniers travaux du Giec. En janvier 2021, il a adopté la « Stratégie climatique à long terme de la Suisse » qui présente les lignes directrices de la politique climatique jusqu'en 2050 et définit pour les différents secteurs les objectifs stratégiques correspondant à **zéro émission nette globale**. Sous la pression de l'initiative populaire « Pour un climat sain (initiative pour les glaciers) », le Parlement a élaboré la loi sur le climat et l'innovation (LCl,

RS 814.310), approuvée en votation populaire le 18 juin 2023 et entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2025. Cette loi donne une base légale à cet objectif zéro net en 2050 et précise que les bâtiments et les transports ne devront plus émettre de GES en 2050 et l'industrie, au plus un dixième de ses émissions de 1990. En même temps, le Parlement a inscrit dans la loi que ces objectifs doivent être économiquement supportables et atteints « dans la mesure du possible » par des réductions d'émissions réalisées en Suisse, ce qui ouvre la porte à un nouvel échec dans la poursuite de ces objectifs.

Zéro net ne signifie de toute façon pas que les émissions de GES sont nulles. Les prévisions officielles de ce qui serait possible¹¹ prévoient encore la production de 11,8 millions de tonnes de CO₂eq en 2050, principalement dans l'agriculture et l'industrie (production de ciment), dont 5,1 Mt seraient empêchées de s'échapper dans l'atmosphère par captation dans les cheminées et enfouissage (technique du CCS). Le solde de 6,7 Mt serait compensé par des émissions négatives, en Suisse et surtout à l'étranger. Les émissions négatives correspondent à du CO₂ retiré de manière permanente de l'atmosphère, ce que l'on sait déjà faire, mais seulement à toute petite échelle et à grands frais (voir section 10.2). Il est d'ailleurs prévu que les émissions négatives dépassent les émissions positives après 2050, de manière que la Suisse contribue à faire redescendre la concentration de GES. Cela est nécessaire, puisque même si les émissions diminuaient linéairement vers un vrai zéro en 2050, leur cumul de 2021 à 2050 correspondrait à 932 millions de tonnes de CO₂eq, soit beaucoup plus que le budget équitable de 250 millions de tonnes¹².

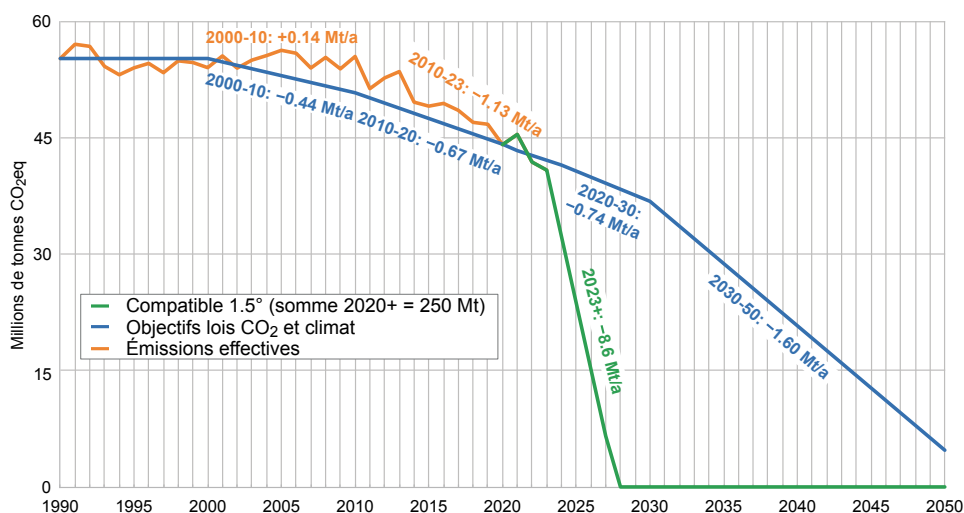
12.3 En résumé

Même un petit pays peut contribuer à la réduction des émissions mondiales de GES, directement et indirectement *via* ses influences dans le monde, surtout la Suisse, qui joue un rôle disproportionné dans la sphère économique mondiale. De plus, elle a un intérêt direct à réduire son utilisation d'énergie fossile et ses émissions de GES, même si cela n'aurait aucun effet sur le climat. La Suisse ne peut pas sauver le monde toute seule, mais elle a intérêt à faire sa part.

Elle a commencé tôt à se doter d'objectifs pour maîtriser ses émissions de CO₂, puis de GES, mais ces objectifs n'ont jamais été ambitieux. Ils le deviennent pour l'horizon 2050 – plus d'impact négatif sur le climat –, mais rien ne garantit pour l'instant que cet objectif sera atteint.

D'ailleurs, même les objectifs peu ambitieux de 2008-2012 et de 2020 n'ont été atteints que grâce à des réductions à l'étranger et au confinement partiel de 2020. Néanmoins, les émissions de GES sur le territoire suisse diminuent depuis 2010, malgré une solide croissance démographique et économique. Cela est en partie le résultat de « l'exportation » d'activités émettrices, c'est-à-dire du remplacement de produits manufacturés en Suisse par des produits importés.

Au rythme de ces quinze dernières années, la Suisse cessera de contribuer au changement climatique dans la seconde moitié de ce siècle, ce qui est trop tard en comparaison avec les objectifs définis. Il faut donc une accélération de la décarbonation pour atteindre l'objectif zéro net en 2050, sans parler du respect du budget carbone équitable pour un réchauffement global limité à 1,5 °C (figure 12.2).



NOTE : Émissions sans changement d'utilisation des sols ni sylviculture (Lulucf).
Quand cela est pris en compte, comme le prévoit le reporting selon la CCNUCC, les émissions de 2023 dépassent celles de 2022 et ne sont inférieures que de 20 % et non 26 % par rapport à celles de 1990.

Fig. 12.2 Émissions de GES de la Suisse¹³.

La Suisse a adopté tôt une diversité de mesures pour moins dépendre d'importations d'énergie fossile, et pour réduire ses émissions de CO₂ d'abord, puis de GES. En même temps, le Parlement a toujours veillé à ne pas trop pénaliser les ménages et les entreprises. Dès lors, sur la base des objectifs et des mesures prévues, elle figure parmi les pays dont l'action climatique est jugée insuffisante.

Références complémentaires

- Informations et documents scientifiques concernant le climat, le changement climatique et la politique climatique en Suisse et dans le monde : <https://sciences-naturelles.ch/climate> (consulté le 13.06.2025).
- Sur les transformations du paysage suisse avec un réchauffement de + 4 °C : « +4 °C et plus : les paysages suisses face au changement climatique », www.wsl.ch/fr/publications/4-c-et-plus-les-paysages-suisse-face-au-changement-climatique (consulté le 13.06.2025). Visualisations 3D interactives : <https://viergrad.envidat.ch> (consulté le 13.06.2025). Rapport complet : S. Tobias *et al.*, *+4 °C et plus. Les paysages suisses face au changement climatique*, Berne, WSL Ber (140), 2023, doi.org/10.55419/wsl:35310.
- Sur la notion de justice climatique : M. Bourban, *Penser la justice climatique*, Paris, Puf, 2018, et P. André, M. Bourban, I. Voiron, « Justice climatique », in M. Kristanek (dir.), *L'Encyclopédie philosophique*, 2025, <https://encyclo-philo.fr> (consulté le 13.06.2025).
- Sur les arguments climatosceptiques les plus courants et leur réfutation sur la base de la science climatique la plus consensuelle : <https://skepticalscience.com> (consulté le 13.06.2025).
- Présentation des instruments de la politique climatique et de leurs avantages et défauts respectifs : <https://sciencesnaturelles.ch/id/ejUCr> (consulté le 13.06.2025).
- Informations et documents de l'administration fédérale concernant les émissions de GES, leur évolution, les impacts du changement climatique et la politique climatique de la Suisse : www.bafu.admin.ch/climat (consulté le 13.06.2025).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour leurs relectures, commentaires et suggestions avisés :

- Michel Bourban, Université de Twente, Pays-Bas ;
- Bruno Lanz, Université de Neuchâtel, Suisse ;
- Nicole Mathys, Office fédéral du développement territorial et Université de Neuchâtel, Suisse ;
- Davnah Urbach, Université de Berne, Suisse ;
- Nigel Gilles Yoccoz, Université de Tromsø, Norvège.

Notes

Chapitre 1

- ¹ www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere (consulté le 13.06.2025).
- ² Du grec « sphère en rotation », pour indiquer le mouvement des masses d'air et leurs turbulences.
- ³ Un inlandsis est un immense glacier continental des régions polaires qui, se fracturant en bord de mer, forme les icebergs (source : CNRTL).
- ⁴ <https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/about-essential-climate-variables> (consulté le 13.06.2025).
- ⁵ IPCC, AR6, WG1, 2021, chap. 2, fig. 2.24.
- ⁶ IPCC, AR6, WG1, 2021, chap. 2, fig. 2.11.

Chapitre 2

- ¹ www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb (consulté le 13.06.2025).
- ² Par exemple pour Enso, voir : www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso (consulté le 13.06.2025), et pour NAO : www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao (consulté le 13.06.2025).
- ³ T. L. Frölicher *et al.*, "Dominance of the Southern Ocean in Anthropogenic Carbon and Heat Uptake in CMIP5 Models", *Journal of Climate*, 28, 2015, p. 862-886.
- ⁴ IPCC, AR6, WG1, 2021, chap. 2, fig. 2.5.
- ⁵ IPCC, "Summary for Policy Makers", AR6, WG1, 2021, fig. 10.
- ⁶ J. E. Tierney *et al.*, "Glacial cooling and climate sensitivity revisited", *Nature*, 584, 2020, p. 569-573, doi.org/10.1038/s41586-020-2617-x.
- ⁷ Brovkin *et al.*, "Comparative carbon cycle dynamics of the present and last interglacial", *Quaternary Science Reviews*, 137, 2016, p. 15-32, doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.01.028.
- ⁸ J. Shakun *et al.*, "Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation", *Nature*, 484, 2012, p. 49-54, doi.org/10.1038/nature10915.

Chapitre 3

- ¹ NOAA, https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/modeling_schematic.html (consulté le 13.06.2025).
- ² IPCC, AR4, WG1, 2007, chap. 1, fig. 1.2.
- ³ IPCC, AR5, WG1, 2013, chap. 11, fig. 11.8.
- ⁴ IPCC, "Summary for Policymakers", AR6, WG1, 2021, fig. SPM.1.
- ⁵ IPCC, "Cross-Section Box.2", AR6, *Synthesis Report*, 2021, fig. 1.
- ⁶ IPCC, "Summary for Policymakers", AR5, 2021.
- ⁷ IPCC, "Summary for Policymakers", AR6, WGII, 2022.
- ⁸ Pour aller plus loin, voir par exemple : K. Riahi *et al.*, "The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview", *Global Environmental Change*, 42, 2017, p. 153-168.
- ⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_MOSE (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁰ D. I. Armstrong McKay *et al.*, "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points", *Science*, 377/6611, 2022, doi.org/10.1126/science.abn7950.
- ¹¹ D. I. Armstrong McKay *et al.*, "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points", art. cit.

Chapitre 4

- ¹ Millennium Ecosystem Assessment (dir.), *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*, Island Press, 2005.
- ² IPBES, *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*, Zenodo, 2019, doi.org/10.5281/zenodo.10413114.
- ³ D. M. Olson *et al.*, "Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity", *BioScience*, 51/11, 2001, p. 933-938.
- ⁴ S. Díaz, J. Fargione, F.S.C Iii, D. Tilman, "Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being", *PLoS Biology*, 4/8, 2006, e277.
- ⁵ A. P. Kinzig, S. W. Pacala, D. Tilman (dir.), *The Functional Consequences of Biodiversity: Empirical Progress and Theoretical Extensions (MPB-33)*, Princeton, Princeton University Press, 2002.
- ⁶ Schéma élaboré à partir de S. Díaz *et al.*, "Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being", *PLoS Biology*, 4/8, 2006, p. 1301.

Chapitre 5

- ¹ F. I. Woodward, M. R. Lomas, C. K. Kelly, "Global climate and the distribution of plant biomes", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 359/1450, 2004, p. 1465-1476.
- ² M. N. Ribero, J. Filloy, "Geographical trends of soil-associated biodiversity changes due to tree plantations in South America: Biome and climate constraints revealed through meta-analysis", *Global Ecology & Biogeography*, 32/11, 2023, p. 2053-2066.
- ³ Schéma élaboré à partir de H. R. Pulliam, "On the relationship between niche and distribution", *Ecology Letters*, 3/4, 2000, p. 349-361.
- ⁴ C. Elton, *Animal Ecology*, New York/Londres, Macmillan/Sidgwick and Jackson, 1927 (2^e édition, 1935 ; 3^e édition, 1947).
- ⁵ Figure réalisée par les soins de l'auteur.
- ⁶ Schéma élaboré à partir de R. A. Ims, E. Fuglei, "Trophic interaction cycles in tundra ecosystems and the impact of climate change", *BioScience*, 55/4, 2005, p. 311-322, et D. Ehrich *et al.*, "Documenting lemming population change in the Arctic: Can we detect trends?", *Ambio*, 49/3, 2020, p. 786-800.
- ⁷ Schéma élaboré à partir de D. Asse, « Comprendre et prédire la réponse des écosystèmes forestiers d'altitude aux changements climatiques : apports d'un programme de sciences participatives. Biologie végétale », Université Montpellier & Université de Lausanne, 2018.
- ⁸ F. H. Fu *et al.*, "Recent spring phenology shifts in western Central Europe based on multiscale observations", *Global Ecology and Biogeography*, 23/11, p. 2014, p. 1255-1263.
- ⁹ Lang, W. *et al.*, (2025). "Phenological divergence between plants and animals under climate change", *Nature Ecology & Evolution*, 9/2, p. 261-272.
- ¹⁰ Schéma élaboré à partir de R. Engler *et al.*, "Predicting future distributions of mountain plants under climate change: Does dispersal capacity matter?", *Ecography*, 32/1, 2009, p. 34-45.

Chapitre 6

- ¹ H. O. Pörtner *et al.* (dir.), IPCC, "Climate Change 2022", *Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press, 2023, doi.org.10.1017/9781009325844.
- ² Schéma élaboré à partir de D. I. Armstrong McKay *et al.*, "Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points", art. cit.
- ³ Schéma élaboré à partir de IPCC, *AR6 WGII*, 2022, chap. 2, "Fig. Cross-Chapter Box EXTREMES.1", p. 216.
- ⁴ P. Friedlingstein *et al.*, "Global carbon budget 2022", *Earth System Science Data*, 14/11, 2022, p. 4811-4900, doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022.

- ⁵ T. M. Lenton *et al.* (dir.), *The Global Tipping Points Report 2023*, Exeter, University of Exeter, 2023.
- ⁶ Schéma réalisé à partir de F.S. Chapin *et al.*, *Science*, 310/5748, 2005, p. 657-660 ; Photo : C. Randin.
- ⁷ MétéoSuisse : www.meteosuisse.admin.ch/climat/changement-climatique.html (consulté le 13.06.2025).
- ⁸ Y. Vitasse *et al.*, "Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps", *Biological Reviews*, 96, 2021, p. 1816-1835, doi.org/10.1111/brv.12727.

Chapitre 7

- ¹ IPCC, "Summary for policy makers", *AR6 WGII*, 2022, p. 9.
- ² IPCC, *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, 2023, p. 125.
- ³ La source principale de l'ensemble de cette section est : IPCC, "Technical Summary", art. cit., chap. B.
- ⁴ Voir aussi : FAO, *L'Impact des catastrophes sur l'agriculture et la sécurité alimentaire 2023*, 2024.
- ⁵ FAO, *L'Impact des catastrophes sur l'agriculture et la sécurité alimentaire 2023*, 2024, p. 22.
- ⁶ B. Desai *et al.*, "Addressing the human cost in a changing climate", *Science*, 372/6548, 2021, p. 1284-1287.
- ⁷ <https://ourworldindata.org/urbanization> (consulté le 13.06.2025).
- ⁸ Undesa, *Revision of World Urbanization Prospects produced by the Population Division of the UN 5 Department of Economic and Social Affairs*, 2018, <https://population.un.org/wup> (consulté le 13.06.2025).
- ⁹ IPCC, "Technical Summary", *AR6 WGII*, 2022, p. 46.
- ¹⁰ IPCC, "Impacts, Adaptation, and Vulnerability", *AR5 WGII*, 2014, p. 3.
- ¹¹ Cela n'est pas forcément vrai concernant l'évaluation économique des dommages causés par un aléa. Paradoxalement, un ouragan qui endommage quelques centaines de bâtiments en Floride occasionne des coûts économiques en valeur absolue beaucoup plus élevés qu'un typhon qui anéantit une ville aux Philippines, en raison de la valeur plus élevée des infrastructures et de la main-d'œuvre nécessaire à la reconstruction. Il n'en reste pas moins que les coûts des dommages rapportés aux revenus sont plus importants dans les pays à faible revenu.
- ¹² IPCC, *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, *op. cit.*, p. 126.
- ¹³ *Ibid.*, p. 98.
- ¹⁴ IPCC, *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, *op. cit.*, p. 75.
- ¹⁵ IPCC, "Technical Summary", art. cit., p. 57-67.
- ¹⁶ L'unité du « jour-personne » permet de caractériser le nombre de personnes exposées à un événement, multiplié par le nombre de jours d'exposition.
- ¹⁷ La typologie des pays à revenu élevé, moyen et faible est tirée de la classification établie par la banque mondiale : <https://blogs.worldbank.org/fr/opendata/nouvelle-classification-pays-revenu-2024> (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁸ S. A. Kulp, B. H. Strauss, "New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding", *Nature Communications*, 10/1, 2019, p. 4844.
- ¹⁹ *Ibid.*, p. 5.
- ²⁰ C. Mora *et al.*, "Global risk of deadly heat", *Nature Climate Change*, 7/7, 2017, p. 501-506.
- ²¹ IPCC, *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, *op. cit.*, p. 73.
- ²² www.metoffice.gov.uk/research/climate/climate-impacts/global-impacts-of-climate-change---projections#Multiple_severe_impacts (consulté le 13.06.2025).
- ²³ <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/INFORM-Climate-Change/INFORM-Climate-Change-Tool> (consulté le 13.06.2025).

Chapitre 8

- ¹ Cette typologie n'est pas exhaustive et il en existe d'autres. On pourrait encore nommer par exemple la justice restaurative, ou réparatrice, qui vise à réparer le tort causé et à renouer des liens de confiance entre les personnes ayant commis l'injustice, la ou les victimes, et la société.
- ² Nations unies, Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, 1992, <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf> (consulté le 13.06.2025).

- ³ S. Gardiner, « Une tempête morale parfaite : le changement climatique, l'éthique intergénérationnelle et le problème de la corruption morale », in M. Bourban, L. Broussois, A. Fragnière, *Philosophie du changement climatique. Éthique, politique, nature*, Paris, Vrin, 2023, p. 61-89.
- ⁴ K. McShane, « L'anthropocentrisme dans l'éthique et la politique climatiques », in M. Bourban, L. Broussois, A. Fragnière, *Philosophie du changement climatique, op. cit.*, p. 273-303.
- ⁵ C. Hickey, I. Robeyns, "Planetary justice: What can we learn from ethics and political philosophy?", *Earth System Governance*, 6/4, 2020, doi:10.1016/j.esg.2020.100045.
- ⁶ D. Roser, C. Seidel, *Climate Justice: An Introduction*, Londres, Routledge, 2016, p. 104.
- ⁷ Oxfam, *Climate Equality: A Planet for the 99%*, 2023, p. 23.
- ⁸ L. Chancel, P. Bothe, T. Voituriez, *Climate Inequality Report 2023*, World Inequality Lab, 2023.
- ⁹ Oxfam, *Climate Equality, op. cit.*, p. 28.
- ¹⁰ Oxfam, *Climate Equality, op. cit.*
- ¹¹ Dans cette étude les 50 % les plus pauvres sont constitués de l'ensemble des personnes gagnant moins de 2000 dollars par an, en parité de pouvoir d'achat. Les 10 % les plus riches sont constitués des personnes gagnant plus de 41 000 dollars par an et les 1 % des personnes gagnant plus de 140 000 dollars.
- ¹² Oxfam, *Climate Equality, op. cit.*
- ¹³ L. Chancel, P. Bothe, T. Voituriez, *Climate Inequality Report 2023, op. cit.*
- ¹⁴ Oxfam, *Climate Equality, op. cit.*, p. 8.
- ¹⁵ <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁶ L. Chancel, P. Bothe, T. Voituriez, *Climate Inequality Report 2023, op. cit.*, p. 117.
- ¹⁷ L. Chancel, P. Bothe, T. Voituriez, *Climate Inequality Report 2023, op. cit.*, p. 117.
- ¹⁸ Il existe en théorie une petite marge de manœuvre quant à la taille du budget carbone restant, selon les hypothèses qui sont faites sur le potentiel des techniques d'émissions négatives pour retirer le CO₂ qui a déjà été émis dans l'atmosphère, en particulier dans la seconde moitié du siècle. Le potentiel de ces techniques est toutefois encore très incertain et spéculatif (voir section 10.2).
- ¹⁹ B. Bruckner et al., "Impacts of poverty alleviation on national and global carbon emissions", *Nature Sustainability*, 5, 2022, p. 311-320.
- ²⁰ H. Shue, "Subsistence emissions and luxury emissions", *Law & Policy*, 15/1, 1993, p. 39-60, p. 56.
- ²¹ H.D. Matthews et al., "Opportunities and challenges in using remaining carbon budgets to guide climate policy", *Nature Geoscience*, 13, 2020, p. 769-779.
- ²² Il faut également ajouter à cela que plus que la date à laquelle un pays cesse d'émettre des GES, c'est la trajectoire, c'est-à-dire la quantité de GES émise jusqu'à cette date, qui compte également. Les trajectoires de réduction des émissions n'étant pas forcément linéaires, cela peut faire une grande différence.
- ²³ S. Caney, « Justice cosmopolitique, responsabilité et changement climatique global », in M. Bourban, L. Broussois, A. Fragnière, *Philosophie du changement climatique, op. cit.*, p. 199-259.
- ²⁴ E. Bard, J. Chappellaz, *Sur les origines de l'effet de serre et du changement climatique*, Paris, La Ville brûle, 2010.
- ²⁵ E. A. Page, "Give it up for climate change: A defence of the beneficiary pays principle", *International Theory*, 4/2, 2012, p. 300-330.
- ²⁶ Caney, S., « Justice cosmopolitique, responsabilité et changement climatique global », art. cit.
- ²⁷ Le *Climate Equity Reference Calculator* propose par exemple de déterminer la juste contribution de chaque pays en choisissant quel poids donner respectivement à la responsabilité et à la capacité à payer dans le calcul. <https://calculator.climateequityreference.org> (consulté le 13.06.2025).
- ²⁸ H. Shue, "Historical responsibility, harm prohibition, and preservation requirement: Core practical convergence on climate change", *Moral Philosophy and Politics*, 2014, p. 1-25.
- ²⁹ Voir par exemple : L. Tomlinson, *Procedural Justice in the United Nations Framework Convention on Climate Change: Negotiating Fairness*, Springer International Publishing, 2015.
- ³⁰ C. Klöck, C. Baatz, N. Wendler, "Procedural justice and (in)equitable participation in climate negotiations", *UCL Open Environment*, 7/1, 2025, doi.org/10.14324/111.444/ucloe.3116.
- ³¹ D. Roser, C. Seidel, *Climate Justice, op. cit.*, chap. 20.
- ³² Voir par exemple la Déclaration des peuples autochtones de l'Amazonie face au changement climatique : https://coicamazonia.org/wp-content/uploads/2020/12/LETTRE-DE-LAMAZONE_COICA.pdf?utm_source=chatgpt.com (consulté le 13.06.2025).

- ³³ K. Lyons, P. Westoby, "Carbon colonialism and the new land grab: Plantation forestry in Uganda and its livelihood impacts", *Journal of Rural Studies*, 36, 2014, p. 13-21.
- ³⁴ Rights and Resources Initiative, *Mai-Ndombe: Will the REDD+ laboratory benefit Indigenous Peoples and local communities? Analysis of the cumulative impacts and risks of REDD+ initiatives*, Washington, DC, March 2018.
- ³⁵ F. M. Cooke *et al.*, "The limits of social protection: The case of hydropower dams and indigenous peoples' land", *Asia & the Pacific Policy Studies*, 4/3, 2017, p. 437-450.
- ³⁶ IPCC, *WGII Technical Summary*, 2022, p. 81.

Chapitre 9

- ¹ G. Hardin, "The Tragedy of the Commons", *Science*, 162/3859, 1968, p. 1243-1248. Pour la traduction française voir : *La Tragédie des communs*, Paris, Puf, 2018.
- ² On sait aujourd'hui, notamment grâce aux travaux d'Elinor Ostrom, que la plupart des pâturages communaux traditionnels sont en réalité dotés de système de régulation informels et ne sont donc pas soumis à la tragédie des biens communs. L'exemple des pâturages est donc à comprendre comme une fable qui a vocation d'illustration. L'analyse peut toutefois s'appliquer à d'autres types de ressources.
- ³ S. M. Gardiner, *A Perfect Moral Storm: The Ethical Tragedy of Climate Change*, Oxford, Oxford University Press, 2011.
- ⁴ Un historique de la genèse du régime multilatéral actuel de gouvernance du climat peut être trouvé ici : www.iisd.org/fr/articles/la-gouvernance-mondiale-des-changements-climatiques-en-quete-defficacite-et-duniversalite (consulté le 13.06.2025).
- ⁵ www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_what_ipcc_fr.pdf (consulté le 13.06.2025).
- ⁶ <https://unfccc.int/fr/processus-et-reunions/qu-est-ce-que-la-cnucc-la-convention-cadre-des-nations-unies-sur-les-changements-climatiques> (consulté le 13.06.2025).
- ⁷ <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris> (consulté le 13.06.2025).
- ⁸ <https://unctad.org/fr/news/nouvel-objectif-de-financement-climatique-comment-les-pays-en-developpement-peuvent-ils-en> (consulté le 13.06.2025) ; <https://climatepromise.undp.org/fr/news-and-stories/quest-ce-que-le-financement-climatique-et-pourquoi-faut-il-laugmenter> (consulté le 13.06.2025).
- ⁹ www.iisd.org/articles/statement/cop-29-moves-needle-on-finance?gad_source=1&g-braid=0AAAAADQ3eTBrasep3c80NWQ7L0hFUmmIN&gclid=CjwKCAiAnKi8BhB0EiwA58DA-4fUxFLZ4wGI_p0FwP5xLjan4eqc_XRfAdO1CkuGEZY0DkWTW1JS-RoCrNkQAvD_BwE (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁰ www.carbonbrief.org/timeline-the-paris-agreements-ratchet-mechanism (consulté le 13.06.2025).
- ¹¹ <https://cvfv20.org> (consulté le 13.06.2025).
- ¹² <https://poweringpastcoal.org> (consulté le 13.06.2025).
- ¹³ www.aosis.org (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁴ www.c40.org (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁵ <https://iclei.org> (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁶ www.theclimategroup.org/under2-coalition (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁷ www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024 (consulté le 13.06.2025). Voir aussi le site du projet Climate Action Tracker : <https://climateactiontracker.org/global/temperatures> (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁸ IPCC, *Global Warming of 1.5 °C*, 2018.
- ¹⁹ *Ibid.*, p. 555.
- ²⁰ Pour plus de détails, voir : www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/dossiers/magazine-2022-2-dossier/un-pilier-incontournable-de-la-politique-climatique.html (consulté le 13.06.2025).
- ²¹ United Nations Environment Programme, *Emissions Gap Report 2024*, 2024, p. 30.
- ²² J. Worland, "How to Avoid a Climate Backlash", *Time*, 30 juillet 2024, <https://time.com/6998407/climate-backlash-how-to-avoid> (consulté le 13.06.2025).
- ²³ T. Chan *et al.*, *Corruption and Integrity Risks in Climate Solution: An Emerging Global Challenge*, Londres, Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment and Centre for Climate Change Economics and Policy, London School of Economics and Political Science, 2023.

- ²⁴ J. Depledge, K. De Pryck, J.T. Roberts, "Decades of Systematic Obstructionism: Saudi Arabia's Role in Slowing Progress in UN Climate Negotiations", *Climate Social Science Network Issue Paper*, 1, 2023. Aykut et Dahan parlent par ailleurs d'un « trio fossiliste » qui rend très difficile toute solution au problème climatique : la Chine, pays du charbon qui possède les réserves les plus importantes au monde et consomme à elle seule près de la moitié de la production mondiale ; la Russie, dont l'énergie primaire repose à 50 % sur le gaz et qui en exporte massivement ; et les États-Unis, dont le recours aux hydrocarbures pour satisfaire son économie très gourmande en énergie a encore augmenté avec l'exploitation des gaz et huiles de schiste, et qui joue le rôle de gendarme mondial pour assurer la pérennité des approvisionnements et le fonctionnement du marché mondial de pétrole. Voir : S.C. Aykut, A. Dahan, « La gouvernance du changement climatique : anatomie d'un schisme de réalité », in *Gouverner le progrès et ses dégâts*, Paris, Découverte, 2014, p. 97-132, <https://hal.science/hal-01403103/document> (consulté le 13.06.2025).
- ²⁵ M. H. Goldberg *et al.*, "Oil and gas companies invest in legislators that vote against the environment", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117/10, 2020, p. 5111-5112.
- ²⁶ K. F. Myers *et al.*, "Consensus revisited: Quantifying scientific agreement on climate change and climate expertise among Earth scientists 10 years later", *Environmental Research Letters*, 16/10, 2021, p. 104030.
- ²⁷ Observatoire international climat et opinions publiques, Obs'COP 2024, EDF, 2024, p. 10, www.edf.fr/groupe-edf/observatoire-international-climat-et-opinions-publiques (consulté le 13.06.2025)..
- ²⁸ Observatoire international climat et opinions publiques, Obs'COP 2024, *op. cit.*
- ²⁹ W. F. Lamb *et al.*, "Discourses of climate delay", *Global Sustainability*, 3/e17, 2020, p. 1-5.
- ³⁰ T. G. Coan *et al.*, "Computer-assisted classification of contrarian claims about climate change", *Scientific Reports*, 2021, p. 1-12.
- ³¹ N. Oreskes, E. M. Conway, *Les Marchands de doute*, Paris, Pommier, 2012.
- ³² P. Diethelm, M. McKee, "Denialism: What is it and how should scientists respond?", *European Journal of Public Health*, 19/1, 2009, p. 2-4.
- ³³ Le très utile site <https://skepticalscience.com> (consulté le 13.06.2025) recense les arguments climatosceptiques les plus courants (plus de 250) et propose des démentis et des réponses détaillées et référencées écrites par des climatologues professionnels.
- ³⁴ M. J. Hornsey *et al.*, "Meta-analyses of the determinants and outcomes of belief in climate change", *Nature Climate Change*, 6/6, 2016, article 6.
- ³⁵ S. Lewandowsky *et al.*, "Nasa faked the moon landing—therefore (climate) science is a hoax an anatomy of the motivated rejection of science", *Psychological Science*, 24/5, 2013, p. 622-633.
- ³⁶ A. Deloffre, L. Francou Damesin, *Climatosceptiques. Enquête au plus près de ceux qui doutent*, Paris, Parlons Climat, 2024, www.parlonsclimat.org (consulté le 13.06.2025).
- ³⁷ *Ibid.*, p. 43.
- ³⁸ N. Oreskes, E. M. Conway, *Les Marchands de doute*, *op. cit.*
- ³⁹ G. Supran, N. Oreskes, "Assessing ExxonMobil's climate change communications (1977-2014)", *Environmental Research Letters*, 12/8, 2017, p. 084019.
- ⁴⁰ R. J. Brulle, "Institutionalizing delay: Foundation funding and the creation of U.S. climate change counter-movement organizations", *Climatic Change*, 122/4, 2014, p. 681-694, doi.org/10.1007/s10584-013-1018-7.
- ⁴¹ T. G. Coan *et al.*, "Computer-assisted classification of contrarian claims about climate change", *Scientific Reports*, 2021, p. 1-12.

Chapitre 10

- ¹ F. Vöhringer *et al.*, "Costs and benefits of climate change in Switzerland", *Climate Change Economics*, 10/2, 2019, p. 1-34. Ces estimations sont à considérer avec beaucoup de prudence car les paramètres sont très incertains.
- ² Cet effet est particulièrement important sur un horizon long, ce qui explique que M. Kotz, A. Levermann, L. Wenz ("The economic commitment of climate change", *Nature*, 628(8008), 2024, p. 551-557) ont

estimé que le revenu net par personne en Suisse serait inférieur de 11 % en 2049 par rapport à un monde sans changement climatique. En moyenne mondiale, la perte serait de 19 %.

- ³ Source de cette donnée : "Our World in Data", *Sector by Sector: Where Do Global Greenhouse Gas Emissions come From?*, 18 septembre 2020, <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> (consulté le 13.06.2025). Davantage de détails sur les dommages : Union of Concerned Scientists, *The Hidden Costs of Fossil Fuels*, 2016, www.ucsusa.org/resources/hidden-costs-fossil-fuels (consulté le 13.06.2025). Pour simplifier, il sera beaucoup question des énergies fossiles dans ce chapitre, mais la discussion s'applique pareillement aux autres sources de GES, auxquelles sont aussi associés de nombreux coûts externes. Par exemple, les coûts sanitaires et le mal-être animal liés à la viande, dont la production est une autre source importante de GES.
- ⁴ Tableau réalisé par les soins de l'auteur.
- ⁵ Tableau réalisé par les soins de l'auteur.
- ⁶ Figure réalisée par les soins de l'auteur.
- ⁷ Pour l'estimation des coûts externes des transports, l'Office fédéral du développement territorial utilise une estimation des dommages causés dans le monde entier par nos émissions de GES de 430 francs par tonne de CO₂ ou équivalent. Ecoplan / Infras, *Externe Effekte des Verkehrs*, « Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekte des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs », *Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung*, 10 octobre 2024.
- ⁸ Schéma de l'Office fédéral de l'environnement, inspiré de J. C. Minx *et al.*, "Negative emissions – Part 1: Research landscape and synthesis", *Environmental Research Letters*, 13/6, 2018, p. 063001, doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b
- ⁹ Cet objectif de la Suisse est détaillé dans la section 12.2. Le concept de zéro net est expliqué dans l'encadré 9.1.
- ¹⁰ S. Nick, P. Thalmann, « Retrait du carbone, net zéro et implications pour la Suisse », *Livre blanc*, 2021, <https://go.epfl.ch/netzero> (consulté le 13.06.2025).
- ¹¹ Figure réalisée par les soins de l'auteur.
- ¹² Figure réalisée par les soins de l'auteur.
- ¹³ "Adaptation options that are feasible and effective today will become constrained and less effective with increasing global warming. With increasing global warming, losses and damages will increase and additional human and natural systems will reach adaptation limits", IPCC, "Summary for policy makers (B.4)", *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*, *op. cit.*
- ¹⁴ Figure réalisée par les soins de l'auteur.
- ¹⁵ Le revenu moyen des importateurs et distributeurs était de 2,6 milliards de francs par an entre 2018 et 2022. Nos calculs et estimations à partir de données provenant de l'Office fédéral de l'énergie (Statistique globale de l'énergie), de l'Administration fédérale des finances et de l'Administration fédérale des douanes.
- ¹⁶ Voir par exemple les estimations par la banque d'affaires Goldman Sachs, "Carbonomics: Innovation, deflation and affordable de-carbonization", *Equity Research*, 13 octobre 2020.
- ¹⁷ Voir par exemple la présentation des effets de la pollution de l'air sur la santé et les écosystèmes : www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/effets-de-la-pollution-atmospherique.html (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁸ "List of cities in China by population", 4 janvier 2025, Wikipedia (anglais), https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_cities_in_China_by_population (consulté le 13.06.2025). "List of U.S. states and territories by population", 11 février 2025, Wikipedia (anglais), https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_U.S._states_and_territories_by_population (consulté le 13.06.2025). Recensements de 2020. La population en Suisse a franchi 9 millions en 2024 (OFS).
- ¹⁹ Association suisse des Banques, *Baromètre bancaire 2021*, 2021, p. 36.
- ²⁰ Public Eye, « La Suisse, plaque tournante des matières premières », www.publiceye.ch/fr/thematiques/negoce-de-matieres-premieres/la-suisse-et-la-malediction-des-ressources/plaque-tournante-des-matieres-premieres (consulté le 13.06.2025).
- ²¹ Données de McKinsey & Co, *Klimastandort Schweiz. Schweizer Unternehmen als globale Treiber für Netto Null*, 2022, www.economiesuisse.ch/fr/articles/climat-la-suisse-un-acteur-qui-compte (consulté le 13.06.2025).

Chapitre 11

- ¹ Aussi «équation de Kaya» ou «décomposition de Kaya», de Yoichi Kaya, un économiste de l'énergie japonais.
- ² Calculs de l'auteur réalisés à partir de données de l'OFS et de l'Ofen. Les valeurs pour 2050 sont basées sur les hypothèses des perspectives énergétiques 2050+ de la Confédération, sauf la population, qui correspond aux projections moyennes 2025 de l'OFS. Le facteur de croissance pour chaque variable correspond à sa valeur terminale divisée par sa valeur initiale.
- ³ Entre 1990 et 2023, la population a augmenté de 32 % et la surface d'habitat chauffée par personne, de 14 %. Dans le même temps, la dépense d'énergie par mètre carré chauffé a baissé de 42 % et l'émission de CO₂ par unité d'énergie, de 40 %. L'effet net de ces évolutions opposées est une réduction des émissions de CO₂ en lien avec l'habitat de 48 %. Les données viennent des offices fédéraux de la statistique (OFS), de l'environnement (Ofev) et de l'énergie (Ofen). Pour l'analyse analogue de l'OFS, voir www.bfs.admin.ch/asset/fr/32331200 (consulté le 13.06.2025).
- ⁴ Par exemple, pour la France : C. Dugast, A. Soyeux, *Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique*, Paris, Carbone 4, 2019, et pour la Suisse : J. Rohrer, *Klimaaerhitzung: Welchen Beitrag können Eigenverantwortung bzw. politische Massnahmen leisten?* ZHAW, 2021, doi:10.21256/zhaw-2419.
- ⁵ On pourrait aussi écrire personne-kilomètre. Il s'agit d'une unité de mesure du volume de transport correspondant au transport d'une personne sur un kilomètre.
- ⁶ P. De Haan, « Transports », in Académies suisses des sciences, *Coup de projecteur sur le climat Suisse. État des lieux et perspectives*, Berne, Bande, 2016, chap. 3.5, p. 174-177. Consommation de kérosène = (personnes × km) × (kérosène par personne × km). En divisant cette équation en 2010 par l'équation en 1990, on obtient $1,40 = 3,5 \times 0,4$.
- ⁷ Ademe, Base Empreinte, version 23.1, <https://base-empreinte.ademe.fr> (consulté le 13.06.2025).
- ⁸ Dernière donnée disponible au moment de la rédaction. Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2024.
- ⁹ Tableau réalisé par les soins de l'auteur.
- ¹⁰ En juin 2021, une courte majorité de 103 114 personnes a rejeté une nouvelle loi sur le CO₂ qui prévoyait, entre autres, de relever le plafond de la taxe sur le CO₂ à 210 francs. Le Parlement en a déduit qu'il était politiquement impossible de renforcer les instruments de type taxes pour atteindre les objectifs de décarbonation.
- ¹¹ Sandbag, *Carbon Price Viewer*, 2025, <https://sandbag.be/carbon-price-viewer> (consulté le 13.06.2025).
- ¹² Le transport aérien international est encore mieux protégé que les transports terrestres puisqu'il échappe non seulement à toute taxe liée à son impact considérable sur le climat, mais il ne paie même pas les impôts sur les huiles minérales et la TVA, contrairement au transport aérien à l'intérieur des frontières.
- ¹³ L'encouragement des transports en commun et des modes de mobilité actifs est pratiquement le seul moyen dont disposent les cantons et les communes pour soutenir la décarbonation des transports.
- ¹⁴ Voir www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/efficacite/mobilite/prescriptions-concernant-les-emissions-de-co2-des-vehicules-neufs.html (consulté le 13.06.2025).
- ¹⁵ C'est la raison pour laquelle l'UE prévoit d'interdire la mise en circulation de voitures à moteur thermique dès 2035, afin qu'il n'en reste plus en 2050.
- ¹⁶ Elles se sont élevées à 1,8 million de francs en 2023, mais l'Association des importateurs de voitures redoute des sanctions s'élevant à plusieurs centaines de millions en 2025, en raison de l'abaissement des valeurs limites alors que la part de marché des véhicules électriques stagne.
- ¹⁷ Depuis 2005, date des premières statistiques, la proportion de voitures de tourisme vendues dont la puissance du moteur dépasse 200 kW a continuellement augmenté, passant de 3 % à 22 % (2023). Même si la puissance ne dépend pas uniquement de la cylindrée, ce sont essentiellement les cylindrées supérieures à 2500 cm³ qui dépassent 200 kW. Pour le poids à vide, les statistiques remontent à 1990, année où il était en moyenne de 1,2 tonne. Il a également augmenté de manière continue pour atteindre 1,78 tonne en 2023. Statistiques de l'Ofen.

- ¹⁸ Selon une publication de l'Ofev, les émissions des véhicules à essence neufs n'ont pas baissé en situation réelle, en tout cas pas entre 2002 et 2021. Ofev, « Émissions polluantes du trafic routier de 1990 à 2060 », État 2024, 2024, fig. 15.
- ¹⁹ En octobre 2020, la Suisse et le Pérou ont signé un accord qui crée les conditions nécessaires pour que la Suisse puisse compenser une partie de ses émissions de CO₂ via des projets menés au Pérou. Il s'agit du premier accord de ce genre au niveau mondial conclu dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat.
- ²⁰ Concernant les impacts négatifs de projets de compensation pour les populations locales, voir la section 8.4.
- ²¹ Voir par exemple B. S. Probst *et al.*, "Systematic assessment of the achieved emission reductions of carbon crediting projects", *Nature Communications*, 15, 9562, 2024, doi:10.1038/s41467-024-53645-z.
- ²² Notre analyse de ces instruments suggère que ce sont les prescriptions cantonales en matière d'efficacité énergétique des bâtiments qui ont le plus contribué à la réduction des émissions de CO₂ en Suisse, alors qu'elles préexistaient à la politique climatique : P. Thalmann, M. Vielle, « Qu'est-ce que la politique climatique de la Suisse a déjà obtenu ? », *La Vie économique/Die Volkswirtschaft*, 91/11, 2018, p. 12-15. <https://dievolkswirtschaft.ch/fr/2018/10/thalmann-vielle-11-2018fr> (consulté le 13.06.2025).

Chapitre 12

- ¹ L'Ofev, chargé d'inventorier les émissions de GES, ne le fait que depuis 1990.
- ² Sur la base de l'évolution générale des prix aux États-Unis depuis 1974, ces 11 dollars US de 1974 correspondent à 70 dollars de 2024, voir CoinNews, *Inflation Calculator*, 2025, www.usinflationcalculator.com (consulté le 13.06.2025).
- ³ Ofev, Inventaire des émissions de GES, avril 2025.
- ⁴ Graphique réalisé par les soins de l'auteur avec données Ofev, Inventaire des émissions de GES, avril 2025.
- ⁵ Elles étaient effectivement inférieures de 1,6 % en 2000 par rapport à 1990 (Ofev, « Émissions polluantes du trafic routier de 1990 à 2060 », art. cit.).
- ⁶ OFS, *Aviation civile*, 2024, www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transport/themes-transversaux/aviation-civile.html (consulté le 13.06.2025). Le niveau des émissions de 2023 n'avait pas encore rejoint celui de 2019, marquant encore le contrecoup de l'arrêt du transport de personnes pendant la crise du Covid-19.
- ⁷ Statistiques de l'OFS.
- ⁸ Source des données : Ofev, www.bfs.admin.ch/asset/fr/27705362 (consulté le 13.06.2025).
- ⁹ Les estimations du budget mondial restant du Giec sont actualisées chaque année par IGCC (www.igcc.earth [consulté le 13.06.2025]). Les estimations de 2024 placent le budget mondial compatible avec 1,5 °C de réchauffement avec deux tiers de probabilité à 150 Gt CO₂ au début de 2024. Il est courant, mais pas forcément équitable, de réclamer pour la Suisse une part du budget mondial égale à sa part de la population mondiale, soit environ 1 millième. D'autres estimations sont possibles mais ne changent pas grand-chose au constat que la Suisse va très prochainement épuiser son budget carbone.
- ¹⁰ Avenergy Suisse, communiqué de presse, 21 septembre 2023.
- ¹¹ Office fédéral de l'énergie, *Perspectives énergétiques 2050+*, 2020.
- ¹² Interpellé au Parlement sur ce dépassement massif, le Conseil fédéral a répondu qu'il « n'examine pas dans quelle mesure l'évolution des émissions en vue d'atteindre cet objectif correspond à un budget juste ou approprié », réponse du Conseil fédéral du 2 février 2022 à l'interpellation 21.4552.
- ¹³ Calculs et graphique réalisés par les soins de l'auteur avec données de l'inventaire des GES (avril 2025), de la loi sur le CO₂ et des perspectives énergétiques 2050+.

Biographies

Augustin Fragnière est directeur adjoint du Centre de compétences en durabilité de l'Université de Lausanne (UNIL) et chargé de cours de la Faculté des géosciences et de l'environnement. Ses recherches portent sur les questions d'éthique et de justice climatique ainsi que sur les théories de la durabilité et de la transition écologique. Il enseigne ces matières depuis plusieurs années dans le cadre du programme de Sciences humaines et sociales de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Jacopo Grazioli est chef du secteur d'hydrométrie à l'Office cantonal des eaux de Genève. Auparavant, il a été responsable de la formation à la durabilité à l'EPFL et chargé de cours. Ses recherches ont porté principalement sur la mesure et la modélisation des précipitations.

Samuel Jaccard est professeur de sciences de la Terre à l'UNIL et auteur principal du groupe de travail 1 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ses enseignements et recherches portent sur le paléoclimat et la paléocéanographie, ainsi que sur les dynamiques du changement climatique récent.

Christophe Randin est professeur associé *ad personam* à l'Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) de l'UNIL. Il combine le suivi à long terme et la modélisation pour mieux comprendre l'impact du changement climatique sur la végétation des montagnes. Il est également investi dans la médiation scientifique à travers le Jardin FloreAlpe, dont il est directeur.

Philippe Thalmann est professeur d'économie à l'EPFL. Il enseigne l'économie urbaine et de l'environnement. Ses recherches servent principalement à soutenir les politiques publiques en faveur de la protection de l'environnement et du climat. Il a été président du Forum sur le climat de l'Académie suisse des sciences et membre de l'Organe consultatif sur les changements climatiques du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

