

LES POINTS DE BASCULE

Revisiter l'urgence climatique pour une action plus efficace



Stéphane Bilodeau, ing. Ph. D., FIC
Groupe de recherche STIM-CS

Stéphane Bilodeau

ISBN

Groupe de recherche STIM-CS

978-2-9822218-0-2

LinkedIn : <https://www.linkedin.com/in/stephane-bilodeau/>

Facebook : [STIM-CS \(Climat Santé\)](#)

Medium : <https://smbilodeau.medium.com/>

Twitter : [@smbilodeau](#)

Illustration couverture générée par IA (Dalle-e)

Stéphane Bilodeau

Les points de bascule

-

*Revisiter l'urgence climatique pour une
action plus efficace*

Ce livre a été publié par le Groupe de recherche STIM-CS

ISBN : 978-2-9822218-0-2

© Stéphane Bilodeau

Tous droits de reproduction, d'adaptation et de traduction,
intégrale ou partielle réservés pour tous pays.

L'auteur est seul propriétaire des droits et responsable du contenu de ce livre.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	X
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XI
RÉSUMÉ	13
INTRODUCTION	16
CHAPITRE 1	20
POINTS DE BASCULE	
ORIGINES ET DEFINITION DES POINTS DE BASCULE CLIMATIQUES	20
LIEN ENTRE LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET L'IMMINENCE DES POINTS DE BASCULE	22
CHAPITRE 2	27
PRINCIPAUX POINTS DE BASCULE CLIMATIQUES	
RISQUES LIES AUX POINTS DE BASCULE CLIMATIQUES	30

CHAPITRE 3	68
-------------------------	-----------

PRINCIPAUX POINTS DE BASCULE NON CLIMATIQUES

POINTS DE BASCULE STRUCTURELS NON CLIMATIQUES	68
<i>Points de bascule alimentaires</i>	70
<i>Points de bascule de l'eau de surface</i>	83

CHAPITRE 4	86
-------------------------	-----------

RISQUES, URGENCE ET INTERACTIONS

IMPORTANCE DE L'EVALUATION DES RISQUES.....	86
<i>Points de bascule déjà traversés ou imminents</i>	87
<i>Autres aspects à considérer concernant l'urgence</i> <i>climatique</i>	93
PROCESSUS DE L'EVALUATION DES RISQUES.....	111
URGENCE ET POINTS DE BASCULE.....	117
<i>Évaluation des risques et priorisation des actions</i>	125

CHAPITRE 5	137
-------------------------	------------

IMPACTS ET INTERVENTIONS

IMPACTS SUR LES INFRASTRUCTURES.....	138
INSUFFISANCE DES INVESTISSEMENTS	141
AGIR EFFICACEMENT POUR LE CLIMAT, C'EST POSSIBLE	151
<i>Risques non linéaires</i>	158
APPLICATIONS CONCRÈTES ET EFFICACES.....	162
<i>Adoption d'une approche holistique</i>	162
<i>Approche intégrée en matière d'infrastructures</i>	168
<i>Création de multiples systèmes d'action polyvalents :</i> <i>une approche proactive</i>	175
<i>Solutions créatives</i>	179

CONCLUSION.....	194
REMERCIEMENTS	201
RÉFÉRENCES.....	202

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 – Effet domino	21
FIGURE 2 – Série chronologique de température moyenne globale	24
FIGURE 3 – Anomalies dans les masses d'eau de surface en septembre 2023 par rapport à la moyenne de 2005 à 2010	33
FIGURE 4 – Glacier Cadman	37
FIGURE 5 – Iceberg A23A.....	38
FIGURE 6 – NASA Ocean Color	40
FIGURE 7 – Glace dans l'Arctique	41
FIGURE 8 – Graphiques des intervalles de confiance de type Bootstrap, de fenêtre d'estimation optimale et de contrôle du modèle.....	45
FIGURE 9 – Premiers répondants sur un site d'accident à New York	46
FIGURE 10 – Estimation du maximum de vraisemblance du temps de basculement sur 1 000 conditions d'essai	48
FIGURE 11 – Croquis simplifié de la thermohaline globale.....	51
FIGURE 12 – Perspectives de blanchiment des coraux sur quatre mois – Stress thermique	54
FIGURE 13 – Modèle 3D biogéochimique du cycle du mercure marin MERCY v2.0	56
FIGURE 14 – Points chauds rapportés par Canada Fire depuis le début de saisons	59
FIGURE 15 – Température moyenne de l'air de surface à l'échelle mondiale pour tous les mois de juillet de 1940 à 2023.....	61
FIGURE 16 – Températures quotidiennes de l'air à la surface du monde (°C) du 1 ^{er} janvier 1940 au 31 juillet 2023	63

FIGURE 17 – Températures quotidiennes mondiales de surface de la mer (°C) du 1 ^{er} janvier 1979 au 31 juillet 2023	65
FIGURE 18 – Survie de la vie marine à base de carbonate selon le pH.....	81
FIGURE 19 – Effet domino en série	99
FIGURE 20 – Vue schématique des points de bascule du système climatique terrestre, de leur connectivité et de leurs interactions	101
FIGURE 21 – Augmentation de la mortalité des arbres.....	103
FIGURE 22 – Limites planétaires en 2022	107
FIGURE 23 – Diagramme de l'assemblage d'interactions identifiées, suivant une disposition de type « Force-Directed »	109
FIGURE 24 – Charte de déclenchement des plus imminents points de bascule du climat (CTP).....	124
FIGURE 25 – Illustration des limites planétaires et de leur niveau de dépassement	128
FIGURE 26 – Subventions aux combustibles fossiles	147
FIGURE 27 – Subventions à la consommation de combustibles fossiles par combustible 2010-2022	151
FIGURE 28 – Mesures de température de surface globale des 17 et 18 novembre 2023	153

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 – Seuils de réchauffement des points de bascule climatiques	119
TABLEAU 2 – Solutions créatives, innovantes et durables	189

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ATP	Adénosine triphosphate
CDN	Contributions déterminées à l'échelle nationale
CH₄	Méthane
CO₂	Dioxyde de carbone
COV	Composés organiques volatils
CTP	<i>Climate Tipping point</i> ou Points de bascule climatiques
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GOES Team	Global Ocean Exploratory Survey
IGN France	Institut national de l'information géographique et forestière de France
IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
IQR	Intervalle interquartile
MeHg	Méthyl-mercure

MLE	Éventualité maximale ou <i>Maximum Likelihood Estimation</i>
N₂O	Oxyde nitreux
SRC	Stockholm Resilience Center

RÉSUMÉ

Ce document prend pour éléments de départ les récentes températures extrêmes records, les feux de forêt et la fonte de la glace ou du pergélisol de 2023, qui ont exercé une pression immense sur les réseaux électriques, ont mis en péril l'approvisionnement en eau et causé des dommages aux routes.

Les climatologues mettent en garde depuis des décennies contre les effets néfastes des phénomènes météorologiques extrêmes dus aux activités humaines. Or, non seulement on observe que ceux-ci se produisent plus fréquemment, et avec une plus grande intensité, mais nous approchons dangereusement de plusieurs points de bascule, qui sont des facteurs souvent négligés.

Les systèmes d'infrastructure qui soutiennent le développement mondial n'ont pas été construits pour résister à des bouleversements climatiques aussi extrêmes. Dans ce contexte, un examen des points de bascule et de leur complexité permet de prendre toute la mesure de l'urgence actuelle. L'approche de l'évaluation des risques est revisitée sous cet angle.

Cet essai rapporte non seulement bon nombre des premiers points de bascule qui seront franchis plus tôt que prévu mais aussi, des voies pour réduire leur impact, et il relève la probabilité qu'ils soient franchis dans un court laps

de temps. Parmi les points de bascule que nous touchons, notons :

- La fonte des glaces de l'Arctique (effondrement des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique occidental et la perte abrupte de glace de mer dans la mer de Barents;
- L'effondrement de la circulation océanique dans la région polaire de l'Atlantique Nord;
- La mort des récifs coralliens dans les basses latitudes;
- Le dégel soudain du pergélisol dans les régions du Nord;
- Les intenses feux de forêt dans le monde entier;
- Les intenses et persistantes vagues de chaleur (avec une augmentation marquée des températures de surface globale et des températures record des océans).

En ce qui touche les voies de mitigation des risques, on pense entre autres à la réduction des subventions aux combustibles fossiles, à la promotion des énergies renouvelables, aux changements de comportements et à l'intelligence artificielle... Ces mesures peuvent constituer des opportunités de pratiques innovantes pour lutter contre le changement climatique. En outre, une approche holistique des phénomènes complexes peut aider à comprendre comment la biosphère terrestre peut être maintenue ou sauvegardée, par exemple en mettant l'accent sur l'énergie générée par la photosynthèse. Ces mesures peuvent contribuer à réduire de manière significative les coûts

sociaux, économiques et écologiques des conditions météorologiques extrêmes ou des points de bascule structurels. En même temps, toutes ces solutions possibles constituent des pistes de recherches futures pour éclairer l'action et pour mieux nous préparer à des solutions efficaces. L'urgence est sur nous; il est temps de commencer à agir avec efficacité, car les conséquences de l'inaction ne feront que s'accroître avec le temps.

Mots-clés : Changement climatique, Points de bascule, Conditions météorologiques extrêmes, énergies renouvelables, réchauffement climatique, thermodynamique, évaluation des risques, température record, vagues de chaleur, feux de forêt.

INTRODUCTION

En 2023, les températures atteintes ont fait pression sur des éléments essentiels. Ainsi, elles ont surchargé les réseaux électriques, précarisé l'approvisionnement en eau potable et causé des inondations, qui ont notamment endommagé les routes.

Juillet 2023 a été le mois le plus chaud jamais enregistré, avec des vagues de chaleur extrêmes en Europe, en Afrique du Nord, en Antarctique et dans les Amériques. Ces conditions ont entraîné des feux de forêt fulgurants, anormalement gigantesques et meurtriers dans le monde entier, allant d'Hawaï à la Grèce, de l'Espagne au Canada. Les océans ont également connu des températures élevées sans précédent, dégradant considérablement les récifs coralliens et la vie marine. L'état actuel de l'approvisionnement énergétique mondial, des systèmes de transport et de nos infrastructures est inadéquat pour faire face à l'imprévisibilité du changement climatique, comme en témoigne la détérioration des infrastructures essentielles dans divers pays. [1, 2, 3 et 4]

Outre la chaleur extrême, de nombreuses régions sont également aux prises avec des inondations dévastatrices en 2023. La Chine a connu ses plus fortes précipitations en 140 ans, causant des destructions généralisées et des pertes de vies, tandis que des inondations ont également frappé la Slovaquie, le Canada et l'Alaska. L'Espagne et le sud de la

Suède ont connu de fortes pluies, ce qui a entraîné des inondations qui ont causé des dommages importants. [5, 6]

Les climatologues mettent en garde depuis des décennies contre les effets néfastes des phénomènes météorologiques extrêmes dus aux activités humaines, qui semblent se produire plus fréquemment et plus intensément. [7, 8]

Or, il existe des balises qui permettent de prévoir les moments où il y aura basculement dans une phase critique caractérisée par une perte de contrôle des conséquences. C'est-à-dire que nous ne parviendrons plus alors à leur faire face de manière suffisante et efficace. Ces moments de basculement correspondent au déclenchement de points de bascule. L'importance de ces derniers n'est pas suffisamment réitérée dans l'espace public, alors que l'amplification et l'accélération des événements extrêmes sont indéniables. Dans ce contexte, suivre l'approche de points de bascule constitue un repère essentiel. C'est qu'ils permettent de se concentrer sur un minimum d'aspects, les plus cruciaux, ceux qui auront une incidence plus efficace.

Le présent ouvrage porte précisément sur cet important concept de points de bascule, souvent décrit par les scientifiques mais négligé dans les diffusions médiatisées. Les points de bascule sont le canari dans la mine. Certains sont déjà traversés, ou leur imminence justifie d'agir immédiatement. Considérer l'action comme une responsabilité logée dans le futur n'est donc plus pertinent. L'impératif d'action est immédiat.

Le concept de point de bascule fait généralement référence à un seuil critique à partir duquel une minuscule perturbation peut modifier substantiellement et qualitativement l'état ou le développement d'un système. Le système concerné est la Terre. Celle-ci est notre seul canot de sauvetage dans cet immense univers. Autrement dit, les points de bascule sont liés à l'avenir de l'humanité. [2, 5, 9, 10 et 11]

Il importe donc de mieux comprendre ce concept et d'en observer les manifestations et les risques associés.

Les points de bascule ne sont pas seulement une théorie selon laquelle le climat pourrait s'en trouver soudainement modifié en raison d'un changement climatique amplifiant d'autres changements. Ils correspondent aussi à de véritables événements aux impacts réels dans la vie des gens, pour lesquels, de nombreux exemples existent, et davantage récemment. De tels exemples se sont en effet multipliés de façon exponentielle en 2023, nous rapprochant de certains points de bascule, à savoir ces seuils qui nous indiquent à quel point nous approchons d'une phase à haut risque. L'an 2023 sera peut-être une charnière en matière de changement climatique tant un changement de régime semble s'y être déclenché par comparaison avec les années antérieures.

Pendant longtemps, traverser les points de bascule semblait un avenir lointain. Mais ce n'est plus le cas. Par ailleurs, les preuves que certains pourraient même se produire plus tôt que prévu commencent à s'accumuler.

De plus, il importe de ne pas considérer que l'urgence d'agir ne porte que sur les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en matière de changement climatique; ce dernier concerne aussi divers autres éléments, en sus des points de bascule. Ceux-ci sont présentés dans cet essai de manière à saisir leur importance, notamment sera mise en lumière son importance pour l'action. Et ce, qu'il s'agisse d'établir des politiques publiques ou de construire ou de procéder à des interventions sur des infrastructures pour les faire résister davantage aux phénomènes météorologiques extrêmes.

Le premier chapitre s'attarde au concept de points de bascule. Les points de bascule climatiques (CTP) et non climatiques sont respectivement présentés dans les chapitres 2 et 3.

La suite du propos vise à faire saisir le concept d'urgence et de son imminence, et que des changements critiques sont déjà en cours. Le chapitre 4 se penche davantage sur l'évaluation des risques et le cinquième, sur les infrastructures et des solutions créatives, selon une approche holistique.

CHAPITRE 1

Points de bascule

Origines et définition des points de bascule climatiques

Il y a deux décennies, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a introduit cette idée de points de bascule, plus connue par le terme « Climate Tipping Point » ou l'acronyme « CTP », dans la langue de Shakespeare. Nous utilisons cet acronyme dans la suite du document. [2, 7, 12 et 13]

Les points de bascule traités dans le présent chapitre sont de nature climatique, puisqu'ils ont un impact sur le climat. Il existe néanmoins des points de bascule dans d'autres domaines, tels que la finance, la politique et la technologie. Par exemple, dans le domaine de la finance, un point de bascule peut être atteint lorsqu'un marché financier s'effondre en raison d'une panique généralisée ou d'une crise économique. Dans le domaine de la politique, un point de bascule peut être atteint lorsqu'un gouvernement perd le soutien de la population et que des manifestations ou des émeutes éclatent. Dans le domaine de la technologie, un point de bascule peut être atteint lorsqu'une nouvelle technologie perturbe radicalement un marché existant et que les entreprises qui ne peuvent pas s'adapter sont éliminées.

Le franchissement des points de bascule peut être difficile à prédire, car il est souvent déclenché par un ou des événements imprévus ou par des interactions complexes entre les systèmes écologiques en jeu. Les points de bascule peuvent aussi être le résultat de rétroactions positives.¹ Les rétroactions sont qualifiées de positives au sens d'amplifier une conséquence initiale. De plus, une rétroaction peut amplifier un effet au point de provoquer une réaction en chaîne ou un effet domino (figure 1).

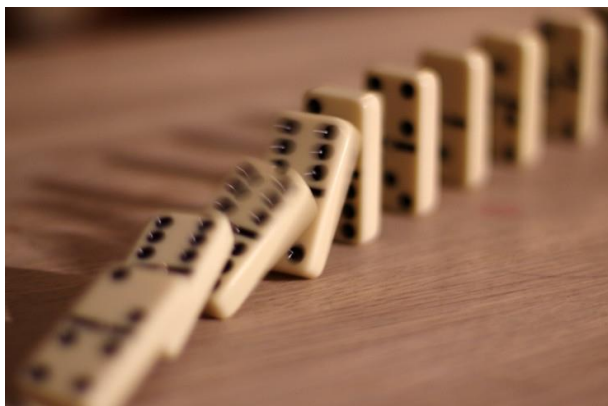


Figure 29 – Effet domino (Photo par KURT, S. via Flickr).

¹ Le concept de rétroaction est souvent utilisé, notamment en biologie, en informatique, en cybernétique ou dans les sciences du climat. Une rétroaction désigne l'action d'un système à la suite d'une modification d'un paramètre. Si la réponse (ou réaction) du système atténue cette modification, on parlera de rétroaction négative. Si elle l'amplifie, on parlera à l'inverse de rétroaction positive. À titre d'exemple, en biologie, une rétroaction négative se produit dans le système hormonal qui s'autorégule. C'est une rétroaction négative, car une action est bloquée; dans ce cas, une hormone bloque sa propre sécrétion lorsqu'elle est produite en trop grande quantité.

Les CTP représentent des seuils critiques dans les systèmes écologiques, puisqu'un petit changement peut entraîner des conséquences drastiques et irréversibles. Un basculement se produit alors; il s'agit d'un instant à partir duquel les choses vont se passer différemment, où une situation évolue dans un sens contraire ou différent. Des points de bascule ne sont donc pas nécessairement des aggravations. Par exemple, on peut penser à des points de bascule sociétaux qui ont mené à des changements sociaux majeurs, comme la fin de l'esclavage ou l'obtention du droit de vote des femmes. Mais à notre époque, et concernant le climat, il est question d'une aggravation. Le dépassement d'un CTP devrait provoquer un changement drastique sur Terre, qui nécessitera des siècles voire des millénaires avant de pouvoir recouvrer un état stable et contrôlable.

Lien entre le réchauffement climatique et l'imminence des points de bascule

Avant de traiter comme telle de l'importance ou de l'imminence des points de bascule, il importe de relever à quel point il est difficile de les repérer.

Reste que les points de bascule se manifestent fréquemment par des signes forts qui indiquent leur arrivée, à savoir des changements majeurs ou des événements imprévus ou des interactions complexes entre les systèmes écologiques.

Cependant, leur apparition peut souvent être difficile à prédire avec exactitude, car les changements initiaux ne

seront pas nécessairement instantanés. L'arrivée de ces derniers peut se dérouler sur une période de quelques années à quelques centaines d'années. Par exemple, on estime qu'une fois enclenché le dégel du pergélisol, un des points de bascule imminents, ce phénomène s'étalera sur une période estimée de 50 ans et la fonte de la calotte du Groenland, de 10 000 ans.

En effet, la survenue de points de bascule se produit sur une période étendue (ce qui rend difficile de percevoir les changements concernés à leur juste mesure). Leur importance est donc bien réelle, en dépit des perceptions que ce ne serait pas le cas.

Or, le franchissement des points de bascule pourrait changer considérablement le fonctionnement des systèmes terrestres, affectant les océans, la météo et les processus chimiques, et ces perturbations pourraient être « irréversibles », selon l'ONU. Nous comprenons donc combien leur imminence est déterminante.

À cet effet, dans les dernières années, à mesure que les données s'accumulent, les preuves montrant qu'on approche des seuils augmentent. De plus, nous pouvons désormais voir de nos propres yeux que ces événements pourraient être plus imminents qu'on ne le pensait. Ces signes nous indiquent que certains points de bascule pourraient être dépassés plus rapidement de prévu ou causer des impacts plus élevés que ce qui était estimé. [22, 23, 25, et 26]

À partir du début des années 2000, et c'était aussi le cas en 2019, la communauté scientifique affirmait encore que ces changements à grande échelle n'étaient probables que si le réchauffement climatique dépassait 5 °C [7, 12 et 13]. Nous savons maintenant que certains basculements surviennent effectivement à des valeurs nettement inférieures à celles qui sont identifiées dans l'Accord de Paris [5, 41, 44, 45 et 46].

Comprenons que le réchauffement climatique accélère le déclenchement de plusieurs points de bascule. Voilà une raison supplémentaire de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels, notamment en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Selon la dernière mise à jour du Climate Analytics and New Climate Institute [8], les politiques nationales d'atténuation mises en place à ce jour, à la suite de l'Accord de Paris, devraient entraîner un réchauffement d'environ 2,9 °C au-dessus des niveaux préindustriels d'ici 2100, dans la continuité de la tendance actuelle (voir figure 2).

Climate Action Tracker		2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Policies and action	High			+1.5	+1.7	+1.9	+2.2	+2.4	+2.6	+2.7	+2.9
	Low			+1.5	+1.7	+1.9	+2.1	+2.2	+2.4	+2.5	+2.6
2030 Targets only				+1.5	+1.7	+1.9	+2.0	+2.1	+2.2	+2.3	+2.4
Pledges and Targets	High			+1.5	+1.7	+1.8	+1.9	+2.0	+2.0	+2.0	+2.0
	Low			+1.5	+1.7	+1.8	+1.8	+1.8	+1.8	+1.8	+1.8
Optimistic scenario (net-zero pledges)				+1.5	+1.7	+1.8	+1.9	+1.9	+1.9	+1.9	+1.8
Historical - Global Mean Temperature time		+1.0	+1.2								

Figure 30 – Série chronologique de température moyenne globale.
Climate Action Tracker: Global Mean Temperature time series. Crédit: Copyright © 2022 Climate Analytics et New Climate Institute
<https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.

Un scénario positif où les gouvernements s'engageraient à respecter les cibles de 2030, soit les contributions déterminées à l'échelle nationale (CDN), limiterait le réchauffement à 2,4 °C. Lorsqu'on fait l'hypothèse de cibles contraignantes à long terme ou de zéro émission nette (ce qui n'est pas le cas des cibles actuelles), le réchauffement pourrait être limité à environ 2,0 °C au-dessus des niveaux préindustriels.

Fournir les efforts pour atteindre les cibles limiterait le réchauffement climatique, ce qui réduirait par la même occasion certains risques de dépassement de points de bascule. Reste que la situation demeurerait périlleuse, puisque plusieurs points de bascule pourraient néanmoins être franchis dans l'intervalle, causant des conséquences inhérentes à la traversée de leurs seuils respectifs, ainsi qu'une accélération par des rétroactions positives. Autrement dit, ne s'occuper que de limiter le réchauffement planétaire ne suffit pas à empêcher un déséquilibre incontrôlable attendu.

Certes, voilà qui donne du poids aux données probantes appelant à des mesures urgentes d'atténuation du changement climatique. Cependant, puisqu'il est aussi important de considérer plusieurs points de bascule, il est tout aussi urgent d'évaluer les risques liés au franchissement de divers points de bascule, de développer une capacité d'alerte précoce, ainsi que des stratégies d'adaptation adéquates. Il en sera question ultérieurement.

De toute évidence, nous devons en faire beaucoup plus, alors que nous n'en mesurons pas la juste ampleur. Il n'est donc pas surprenant que les principaux pays soient en retard dans la réalisation des mesures nécessaires, notamment du côté du financement, comme l'a rapporté en novembre 2022 le Carbon Action Tracker [8]. D'ailleurs, à la COP28 de Dubaï, en décembre 2023, l'accord final conclut :

« ...les données scientifiques [...] indiquent que les émissions mondiales de GES doivent être réduites de 43 % d'ici à 2030, par rapport aux niveaux de 2019, pour limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C. Mais il [le rapport] note que les parties ne sont pas sur la bonne voie pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris [...] À court terme, les parties sont encouragées à présenter des objectifs ambitieux de réduction des émissions à l'échelle de l'économie, couvrant tous les GES, tous les secteurs et toutes les catégories et alignés sur la limite de 1,5 °C, dans leur prochaine série de plans d'action sur le climat, connus sous le nom de contributions déterminées au niveau national ou NDC, d'ici à 2025. » [44]

Chapitre 2

Principaux points de bascule climatiques

Les points de bascule climatiques, abrégés par CTP (pour « Climate Tipping Points »), (CTP) et les non climatiques sont une source croissante d'inquiétude scientifique, politique et publique. C'est que le déclenchement de points de bascule entraîne des impacts importants; il est donc pertinent d'en tenir compte pour les politiques publiques.

Les CTP sont des seuils critiques au-delà desquels le système climatique se réorganise de manière abrupte et/ou irréversible. Ils sont des moments, des événements ou des situations pouvant se produire en raison du réchauffement planétaire. Leurs conséquences devraient provoquer un changement drastique sur le climat, faisant que des siècles, voire des millénaires, soient nécessaires avant de pouvoir recouvrer leur situation initiale. Ils peuvent être provoqués par une petite perturbation entraînant un changement disproportionné dans le système. Les CTP peuvent affecter des éléments à grande échelle, comme les calottes glaciaires ou les courants océaniques, ou des écosystèmes locaux, tels que les coraux ou les forêts.

Il existe des points de bascule climatiques et des non climatiques. Tous deux sont des seuils critiques au-delà desquels un système se réorganise de manière abrupte et/ou irréversible. Ils peuvent être provoqués par des facteurs internes ou externes au système. Les points de bascule non climatiques ne sont tout simplement pas reliés directement au climat, comme c'est le cas de ceux qui sont climatiques. La principale différence entre les CTP et les non climatiques est le type de système concerné et leur lien avec le changement climatique.

Les CTP sont particulièrement importants pour l'étude du changement climatique à l'ère moderne. En effet, ils entraînent des conséquences graves pour les écosystèmes et les sociétés humaines, créant des défis majeurs pour l'adaptation au changement climatique. [47, 48]

Les points de bascule non climatiques peuvent affecter des systèmes sociaux, environnementaux, économiques, politiques, culturels ou technologiques. Par exemple, une crise financière, une révolution, une pandémie ou une innovation peuvent être considérés comme des points de bascule non climatiques. Ces derniers entraînent aussi des conséquences importantes pour les écosystèmes et les sociétés humaines, bien que sur un plan moins englobant que ceux qui sont rattachés au climat, par exemple : des incendies de forêt, des éruptions volcaniques ou la baisse des réserves d'eau des aquifères. Les points de bascule non climatiques peuvent également être déclenchés par des événements imprévus, et ils sont aussi fréquemment le résultat de rétroactions positives. C'est-à-dire qu'un changement initial entraîne des changements

supplémentaires qui amplifient cet effet initial. Ainsi, ils peuvent très bien entraîner des conséquences plus globales; par exemple, la déforestation peut entraîner une perte de biodiversité et une diminution de la capacité des forêts à stocker le carbone.

Bref, les CTP déclenchent des modifications irréversibles dans le système climatique, tandis que les points de bascule non climatiques sont des changements irréversibles dans d'autres types de systèmes.

Un point de bascule est un moment où se produit un basculement, lequel est un grand changement. Celui-ci se compose de différents éléments, ici appelés « éléments de basculement ».

Les grandes modifications produites par des CTP s'autoperpétuent, voire s'autoaccélèrent. De plus, le réchauffement du climat peut les amplifier. Leurs impacts peuvent notamment être une élévation substantielle du niveau de la mer en raison de l'effondrement des nappes glaciaires, le dépérissement des biomes riches en biodiversité, tels que la forêt amazonienne ou les coraux d'eau chaude ou la libération de carbone par le dégel du pergélisol.

Les CTP constituent un indicateur évocateur de l'urgence climatique, puisqu'ils indiquent à quel point on s'approche d'un seuil de non-retour. Le concept d'urgence, qui sera abordé plus loin, exprime l'idée que le changement climatique est une menace grave et imminente, et qu'il faut

agir rapidement et radicalement pour le limiter. Pour être plus précis et représenter l'ensemble des phénomènes climatiques, il nous apparaît qu'il faudrait concevoir l'urgence climatique comme étant associée au risque de franchir des CTP, c'est-à-dire des seuils critiques au-delà desquels le système climatique se réorganise de manière abrupte et irréversible. Il ne suffit pas de ne tenir compte que du réchauffement climatique pour définir l'urgence climatique. C'est le point de vue soutenu dans notre essai.

La fonte du permafrost, la disparition de la banquise arctique, la déstabilisation des calottes glaciaires ou la modification des courants océaniques sont des exemples de points de bascule climatiques potentiels.

Risques liés aux points de bascule climatiques

Approfondissons maintenant certains des risques les plus élevés liés à la traversée de CTP. Parmi les points de bascule souvent cités comme étant les plus imminents dans cette catégorie, on retrouve la fonte de la calotte glaciaire du Groenland, la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest, la mort des coraux tropicaux, le dégel du pergélisol septentrional et la perte de la banquise de la mer de Barents.

Plus précisément, ces CTP se divisent en six catégories, qui seront traitées plus à fond immédiatement après cette liste de CTP :

- 1) Fonte des glaces de l'Arctique :
 - 1.1. Effondrement de l'inlandsis² du Groenland;
 - 1.2. Effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique occidental;
 - 1.3. Perte abrupte de glace de mer dans la mer de Barents.
- 2) Effondrement de la circulation océanique dans la région polaire de l'Atlantique Nord.
- 3) Morts des récifs coralliens dans les basses latitudes.
- 4) Dégel soudain du pergélisol dans les régions du Nord.
- 5) Intenses feux de forêt dans le monde entier.
- 6) Intenses et persistantes vagues de chaleur :
 - 6.1. Augmentation marquée des températures de surface globales;
 - 6.2. Température record des océans.

Revoyons-les plus en détail.

1) Fonte des glaces de l'Arctique : La glace de mer de l'Arctique décline rapidement, atteignant des niveaux alarmants. Or, elle est vitale pour la régulation des régimes climatiques mondiaux, parce qu'elle joue un rôle essentiel sur différents plans, notamment :

² Un inlandsis est un glacier de très grande étendue (dont la superficie dépasse 50 000 km²) se présentant sous la forme d'une nappe de glace recouvrant la terre ferme. Il peut atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur et se prolonger à la surface de la mer en formant des barrières de glace. Il n'en existe plus que deux de nos jours : l'inlandsis de l'Antarctique, le plus étendu, et l'inlandsis du Groenland.

- Elle réfléchit une partie du rayonnement solaire vers l'espace, ce qui limite le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan;
- Elle isole l'océan de l'air froid, ce qui réduit les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de GES;
- Elle influence la circulation océanique, en modifiant la salinité et la densité de l'eau de mer;
- Elle soutient la biodiversité et les écosystèmes marins, en offrant un habitat et une source de nourriture à de nombreuses espèces.

D'ailleurs, le réchauffement des mers a commencé à provoquer un déplacement des espèces de poissons de l'Arctique vers les pôles, redéfinissant ainsi la chaîne alimentaire telle que nous la connaissons. La mer de Barents, au nord de la Norvège, où ce déplacement d'espèces se produit, est l'une des régions marines arctiques les mieux étudiées, comme en font foi les rapports de l'Institut de recherches marines de Norvège [74]. Cette conséquence a un impact sur les écosystèmes polaires et contribue à l'élévation du niveau de la mer et à la perturbation des conditions météorologiques.

De nombreux points de bascule critiques ont été effleurés ces dernières années concernant l'eau de mer et la glace. Il faut rappeler qu'une fois qu'un point critique est franchi – ou « dépassé » –, le problème du système est autoentretenu, de sorte qu'il se poursuivra même s'il n'y a pas d'autre réchauffement. [82, 95 et 108] Voici quelques-uns des CTP les plus critiques au point de vue de la fonte des glaces :

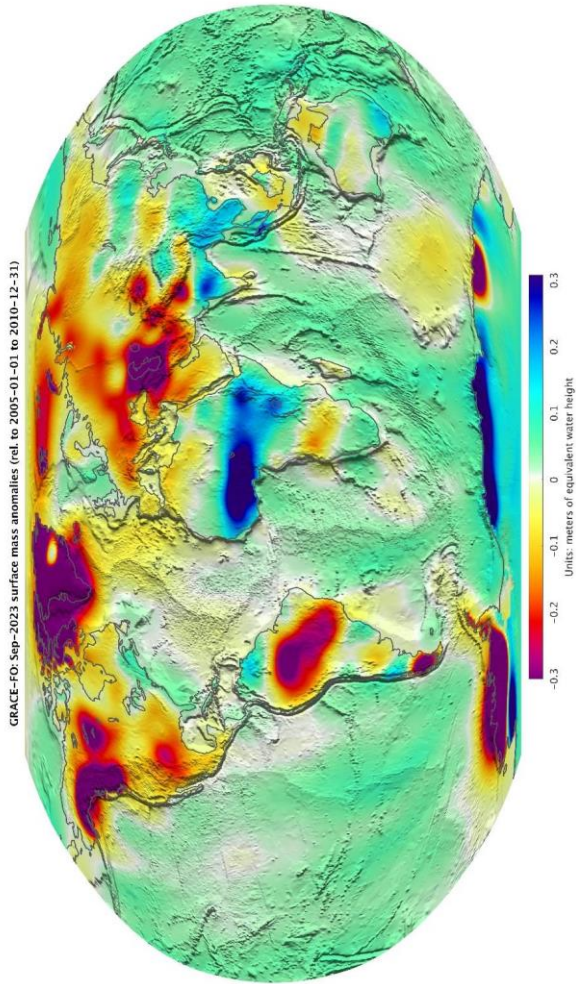


Figure 3 – Anomalies dans les masses d'eau de surface en septembre 2023 par rapport à la moyenne de 2005 à 2010. Source NASA : GRACE-FO Data, Septembre 2023- Les données océaniques GRACE sont supportées par la NASA MEaSUREs Program, et sont disponibles au <http://grace.jpl.nasa.gov>.

1.1. Effondrement de l'inlandsis du Groenland : La calotte glacière (inlandsis) du Groenland est actuellement le plus grand contributeur à l'élévation contemporaine du niveau de la mer. Selon l'ONU, l'inlandsis du Groenland a diminué continuellement au cours des 25 dernières années en raison du changement climatique, de l'accélération de la fonte des surfaces et du vêlage des icebergs. Des recherches basées sur des données satellitaires indiquent qu'entre 2002 et 2020, le Groenland a perdu en moyenne 279 milliards de tonnes métriques de glace par an (soit près de la masse d'eau additionnée de 112 000 piscines olympiques), ce qui s'ajoute à l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Dans le graphique présenté à la figure 3 à la page précédente (utilisant des jeux de données de GRACE et GRACE-FO) sont illustrées les anomalies mensuelles de masse de la glace de surface. Les nuances orange et rouge indiquent les zones qui ont perdu de la masse d'eau, dont la glace. En revanche, les nuances bleu clair indiquent les zones qui ont gagné de la masse d'eau, incluant la glace. Le blanc montre les zones où la masse de glace a très peu ou pas changé depuis 2002.

1.2. Effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique occidental : Tout un secteur de la péninsule qu'on appelle la calotte de l'Antarctique de l'Ouest (ou l'inlandsis de l'Antarctique de l'Ouest) est l'une des plus grandes calottes glacières au monde. Ce secteur perd actuellement de la glace six fois plus vite qu'il y a 30 ans. Même l'Antarctique gelé est en train de

subir les effets des extrêmes climatiques, constatent un nombre grandissant de scientifiques. [6, 82 et 102] De plus, de nombreux rapports récents illustrent l'effondrement de :

- La section de la calotte glacière antarctique, comme celle du glacier Cadman (voir figure 4 à la page 36);
- La section flottante à l'avant du glacier Thwaites (voir figure 5 à la page 37), qui pourrait « se briser comme un pare-brise de voiture » (selon des chercheurs américains et britanniques du [International Thwaites Glacier Collaboration](#)) [99];
- La section du glacier de l'île de Pine dans l'ouest de l'Antarctique, qui a connu un retrait irréversible, traversant un point de basculement jamais atteint au cours des 80 dernières années. L'article, « Recent irreversible retreat phase of Pine Island Glacier » [38], publié dans *Nature Climate Changes*, confirmait ce dernier exemple, alors que les dirigeants mondiaux se réunissaient à Dubaï pour débattre des impacts du changement climatique lors de la COP28.

Une nouvelle étude conclut que l'Antarctique est déjà et continuera d'être touché plus fréquemment et plus gravement.

En outre, un modèle informatique suggère que lorsque le secteur de la mer d'Amundsen s'effondrera, il pourrait déstabiliser le reste de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental, comme une cascade de domino, conduisant à environ trois mètres d'élévation du niveau de la mer sur une échelle de temps de siècles à millénaires.

À mesure que l'altitude de la calotte glaciaire diminue, elle fond davantage, exposant la surface à de l'air toujours plus chaud dans ce qu'on appelle une « rétroaction positive ».

Dans *Nature*, l'article « Climate tipping points – too risky to bet against » ajoute que la menace croissante de changement climatique brusques et irréversibles devrait contraindre à une action politique et économique sur les émissions [2].

1.3. Perte abrupte de glace de mer dans la mer de Barents : La mer de Barents est située au nord de la Norvège et de la Russie. C'est une zone importante pour la formation de la glace de mer. Si la glace de mer devait disparaître de cette région, elle pourrait avoir un impact significatif sur le climat mondial. [4]

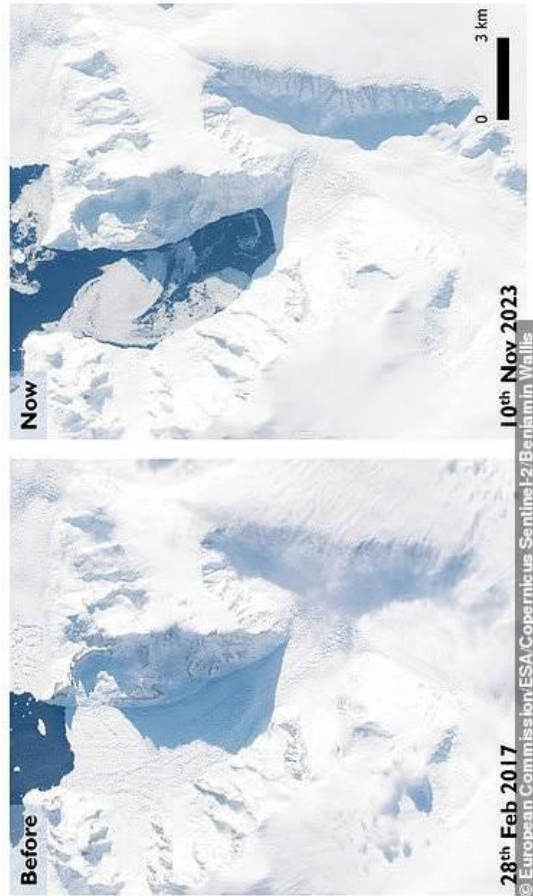


Figure 4 – Glacier Cadman. Cette image montre le glacier Cadman avant et après l'effondrement de sa calotte glaciaire – la partie du glacier où la glace s'étend dans la mer. L'image de gauche (Before) a été prise en février 2017 et celle de droite (Now), en octobre 2023. Source : ESA Copernicus.

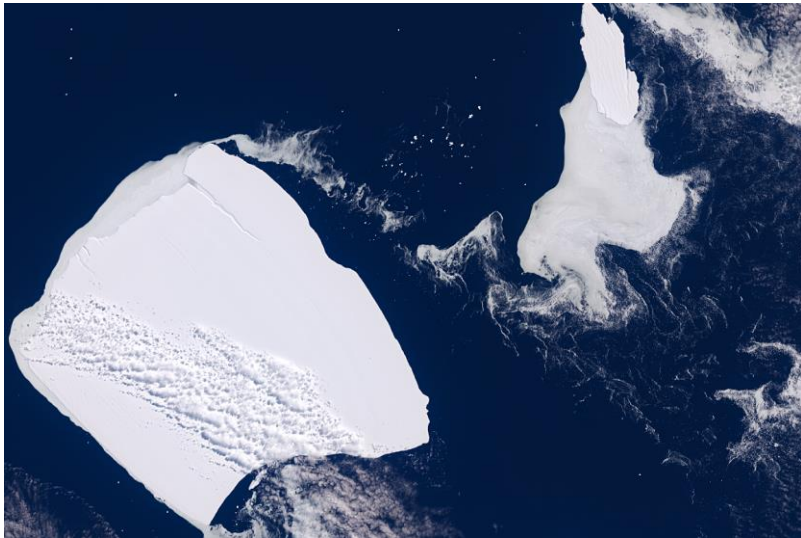


Figure 5 – Iceberg A23A s'éloigne des eaux entourant l'Antarctique. Il couvre une zone à peu près de la taille de l'État du Rhode Island (4000 km²). À certains endroits, son épaisseur est comparable à la hauteur de l'Empire State Building (400 m). À la fin de 2023, il était le plus grand glacier du monde. Il se retrouvera très probablement dans le courant circumpolaire de l'Antarctique. Cette image a été capturée par la NASA avec l'instrument OLI-2 à bord du Landsat 9, le 14 novembre 2023. <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/gallery/794/>.

Des réductions de la glace de mer de l'Arctique ont été observées pour toutes les saisons et toutes les régions. Une [étude](#) publiée en 2023 par Rieke et al. de l'Union européenne de Géosciences a révélé que, dans l'Arctique,

« [...] la mer de Barents est la région de la perte de glace de mer d'hiver la plus intense, et les projections futures montrent une baisse continue des

quantités de glace d'ici la fin de ce siècle ». [108]
(Traduction libre)³

Une [étude](#) de Simpkins [10] publiée en mai dernier dans *Nature Reviews Earth & Environment* a conclu que :

« Les pertes hivernales sont particulièrement fortes dans la mer de Barents, une zone de variabilité interne associée marquée entre l'atmosphère, l'océan et la glace. Cette variabilité interne entraîne des épisodes de croissance ou de perte de glace de mer sur plusieurs années – ce qu'on appelle des événements de changement rapide de la glace – qui peuvent être considérablement plus importants que la tendance forcée de l'extérieur. » [10]

D'autres, comme la NASA, mettent en évidence une manifestation notable de la variabilité interne : soit les événements de changement rapide de la glace (RICE), qui dépassent largement la tendance anthropique⁴ [97].

³ La version originale anglaise de la citation est : « Wintertime losses are particularly strong in the Barents Sea, an area of marked coupled atmosphere-ocean-ice internal variability. This internal variability drives episodes of multi-year sea ice growth or loss – so-called rapid ice change events – that can be substantially larger than the externally-forced trend. »

⁴ La tendance anthropique, ou le changement anthropique, est la partie de la variation du climat qui est attribuable aux activités humaines, comme la combustion des combustibles fossiles, la déforestation, l'agriculture, etc. Ces activités augmentent la concentration de l'atmosphère en GES, comme le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane

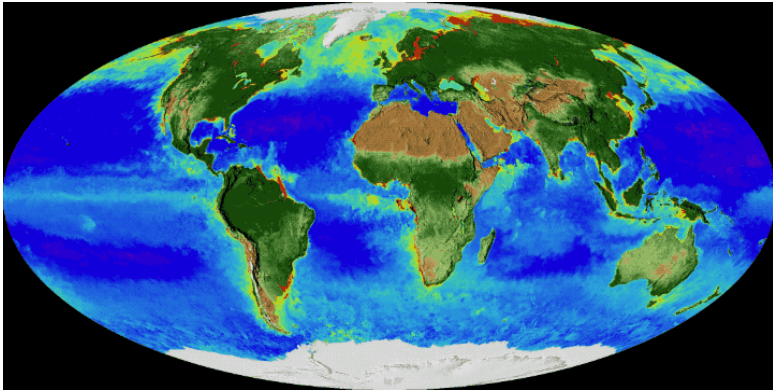


Figure 6 – NASA Ocean Color. La NASA déploie un certain nombre d'instruments d'observation de la Terre qui mesurent la nature spectrale de l'eau (représentée par la couleur). NASA Ocean Biology Processing Group (2019). Ancillary Data Sources. Retrieved from <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> [98].

Dans une image de la NASA (figure 6), nous avons une visualisation d'une année complète créée avec des données de satellites (y compris le SeaWiFS et l'OCEAN, des instruments comme la [suite de radiomètres imageurs infrarouges visibles NASA / NOAA](#) et le spectroradiomètre imageur à résolution modérée). Sur terre, la végétation

(CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), etc. Ces gaz piègent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, ce qui provoque un réchauffement global du climat. La tendance anthropique est détectée et quantifiée par des mesures variées, incluant des satellites d'observation, et des méthodes statistiques, qui comparent les observations du climat avec les simulations numériques réalisées par des modèles climatiques. Ces modèles sont capables de reproduire les principaux processus physiques, chimiques et biologiques qui régissent le climat. Ils permettent de simuler le climat passé, présent et futur, en tenant compte des différents scénarios d'émissions de GES.

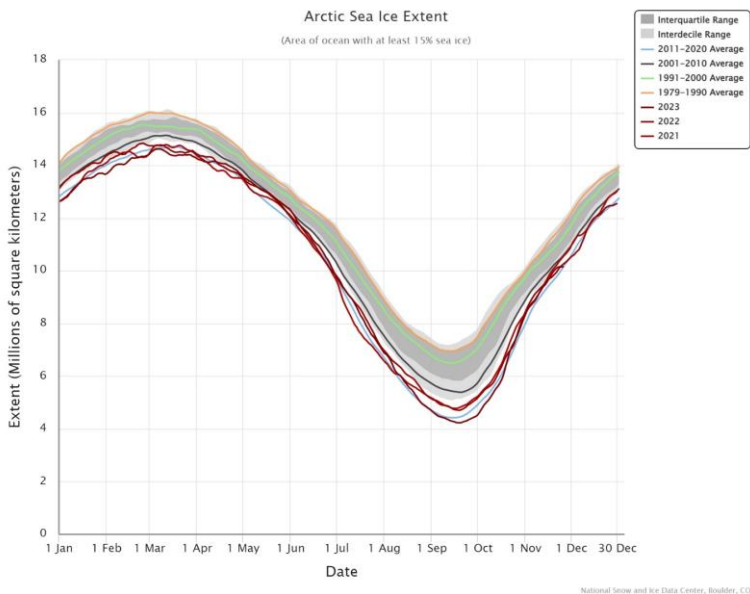


Figure 7 – Glace dans l'Arctique. Étendue de la glace de mer dans l'Arctique en date du 17 juillet 2023, ainsi que les données quotidiennes sur l'étendue de la glace pour les quatre années précédentes et l'année la plus basse jamais enregistrée. Crédit : Données du National Snow and Ice Data Center : http://nsidc.org/data/seaice_index.

apparaît, sur l'image de la figure 6 (page précédente), sur une échelle allant du brun (végétation basse) au vert foncé (beaucoup de végétation); à la surface de l'océan, le phytoplancton est indiqué sur une échelle allant du rouge (faible) au jaune (élevé).

En Alaska, au cours de la première moitié de juillet, l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique a diminué à un rythme proche de la moyenne de 81 800 km² par jour, juste en dessous de la moyenne de 1981 à 2010 de 86 200 km² carrés par jour. En date du 17 juillet, la glace de mer dans l'Arctique est d'environ 1,31 million de km² (506 000 milles carrés) de moins que la période de référence de 1981 à 2010, et l'étendue de la glace est la douzième plus faible des données satellitaires en 45 ans. Le graphique suivant (figure 7 à la page 40) du *National Snow and Ice Data Center* montre l'étendue de la « glace de mer » en Arctique en date de novembre 2023, ainsi que les données quotidiennes sur l'étendue des glaces pour les quatre années précédentes et l'année record (2016). L'année 2023 est représentée en bleu, 2022 en vert, 2021 en orange, 2020 en brun, 2019 en magenta et 2012 en brun pointillé. La médiane de 1981 à 2010 est en gris foncé. Les zones grises autour de la ligne médiane montrent les plages interquartiles et interdéciles des données. L'interquartile⁵ (ou intervalle interquartile : IQR) est une mesure de la dispersion statistique, correspondant à la différence entre les 75^e et 25^e centiles (75 % et 25 %). Le premier quartile est la valeur qui sépare les 25 % des données les plus basses. Le troisième

⁵ L'intervalle interquartile (IQR) est une mesure de la dispersion statistique qui indique à quel point les données sont réparties autour de la médiane. Il se calcule en soustrayant le premier quartile (Q1) du troisième quartile (Q3). L'IQR est utile pour comparer la variabilité de différents ensembles de données, ou pour détecter des valeurs aberrantes. Plus l'IQR est grand, plus les données sont dispersées. Plus l'IQR est petit, plus les données sont concentrées. Une valeur aberrante est une donnée qui se situe très loin de la médiane, généralement au-delà de 1,5 fois l'IQR.

quartile est la valeur qui sépare les 25 % des données les plus hautes. L'IQR représente donc la largeur de l'intervalle qui contient 50 % des données les plus centrales. Il s'agit d'une mesure de variabilité, basée sur la division d'un ensemble de données en quartiles (en quatre parties égales). Par exemple, 25 % des valeurs sont inférieures au 25^e centile (appelé l'interquartile). En ce qui concerne l'interdécile, il est similaire, mais il considère les derniers 10 %; donc 10 % des valeurs sont inférieures à l'interdécile.

2) Effondrement de la circulation océanique dans la région polaire de l'Atlantique Nord : L'Atlantique Nord est une région clé pour la circulation océanique. Le système des courants de l'océan Atlantique (auquel on réfère habituellement par l'acronyme AMOC, pour « Atlantic Meridional Overturning Circulation ») fait partie d'une circulation thermohaline globale dans les océans et il correspond à la combinaison intégrée des courants de surface et profonds dans l'océan Atlantique. Ce courant se caractérise par un flux d'eau chaude vers le nord et d'eau salée dans les couches supérieures de l'Atlantique, ainsi que par un flux d'eau plus froide en profondeur, vers le sud. Si cette circulation s'effondre, elle pourrait avoir un impact significatif sur le climat mondial. Une étude de l'Institut Niels Bohr de Copenhague [1] a déterminé que les estimateurs du maximum de vraisemblance (avec un processus d'Erstein [15]) se rapprochaient du temps de basculement (avec un intervalle de confiance de 95 %) à situer entre 2025 et 2095. Les auteurs ont souligné :

« Nous prédisons avec une grande confiance que le basculement se produira dès le milieu du siècle

(2025-2095 est une fourchette de confiance de 95 %). [...] étant donné l'importance de l'AMOC pour le système climatique, nous ne devrions pas ignorer des indicateurs aussi clairs d'un effondrement imminent. » [1] (Traduction libre)⁶

La figure 8 (page suivante) illustre effectivement que la valeur médiane se trouve à 2057 (pointeur mathématique qu'on peut assimiler à l'année en question), ce qui est près du maximum de probabilité ou d'occurrence d'un point de bascule. Mais si nous plongeons plus loin dans les données des auteurs, il y a un potentiel significatif avoisinant 5,5 % que se produise l'occurrence du CTP de l'AMOC avant 2030. Ce potentiel significatif correspond, sur le graphique de la figure 8, à 55 MLE approximatif (estimation de l'éventualité maximale ou « Maximum Likelihood Estimation », soit le MLE approximatif) du temps de basculement (sur 1000 conditions de test soumises par les auteurs). Quoi qu'il en soit, ces données correspondent à celles qu'a obtenues Boers (*Nature Climate Change*, 2021), qui concluait :

⁶ La version originale anglaise est : « We predict with high confidence the tipping to happen as soon as mid-century (2025-2095 is a 95 % confidence range). [...] given the importance of the AMOC for the climate system, we ought not to ignore such clear indicators of an imminent collapse. » [14].

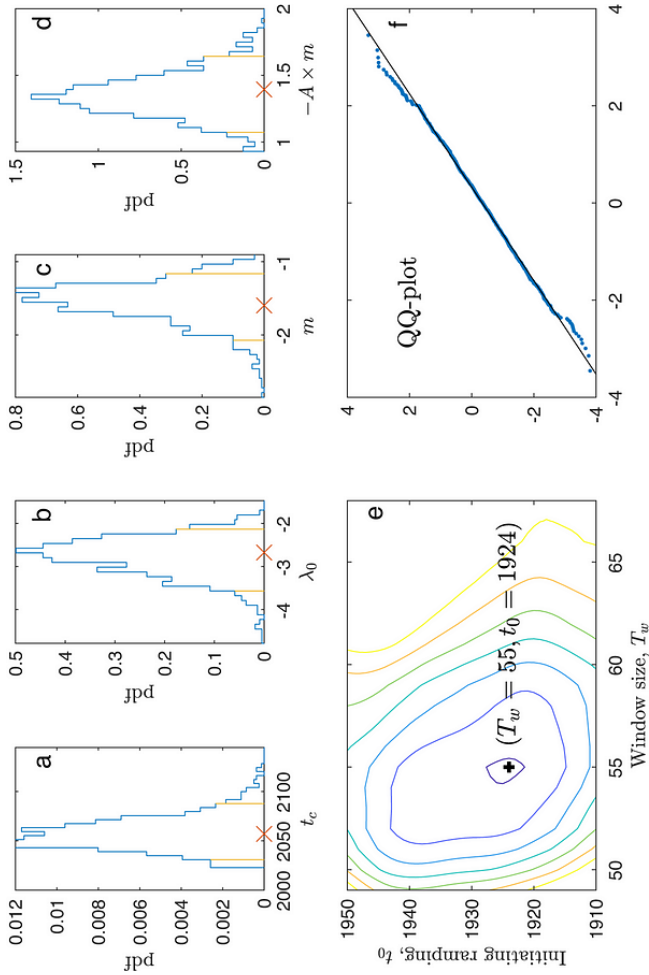


Figure 8 – Graphiques des intervalles de confiance de type Bootstrap, de fenêtre d'estimation optimale et de contrôle du modèle. Source: Ditlevsen et Ditlevsen, Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation, Nature Communication, juillet 2023. <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w> [1].

« Des signaux d'alerte importants sont trouvés dans huit indices AMOC indépendants, sur la base des données d'observation de la température de la surface de la mer et de la salinité à travers le bassin de l'océan Atlantique. Ces résultats révèlent des preuves empiriques spatialement cohérentes que, au cours du siècle dernier, l'AMOC peut être passé de conditions relativement stables à un point proche d'une transition critique. » [52] [traduction libre]⁷



Figure 9 – Premiers répondants sur un site d'accident à New York, New York en septembre 2020, Photo de [Isaac N.](#) sur [Unsplash](#).

⁷ Le texte original anglais [52] : « Significant early-warning signals are found in eight independent AMOC indices, based on observational sea-surface temperature and salinity data from across the Atlantic Ocean basin. These results reveal spatially consistent empirical evidence that, in the course of the last century, the AMOC may have evolved from relatively stable conditions to a point close to a critical transition. »

Le graphique de la figure 10 (page 47) illustre l'éventualité cumulative que le CTP de l'AMOC se produise, calculée en additionnant le pourcentage correspondant à l'éventualité pour chaque année considérée dans les tests effectués par les auteurs. Le graphique illustre que, même avec une marge d'erreur hypothétique de 30 % sur le MLE, ce calcul donne une probabilité de 4 % à 7 % de voir le CTP de l'AMOC franchi avant 2030. À titre de comparaison, le risque annuel moyen pour un New-Yorkais de mourir d'un accident de voiture est 1000 fois plus faible que l'éventualité (soit le MLE) d'un effondrement de l'AMOC – par exemple, selon le New York State Level Data, l'État a connu en moyenne 1 098 décès sur route chaque année, en raison de blessures liées à la circulation, tuant 5,6 sur 100 000 New-Yorkais. En d'autres termes, il faudrait résider 1 000 ans à New York pour cumuler une probabilité de subir un accident (figure 9 page précédente) comparable à la probabilité que l'AMOC puisse survenir dans les 7 prochaines années!

La figure 11 (page 50) montre un croquis simplifié de l'AMOC, faisant partie de la circulation océanique thermohaline⁸ mondiale formée par les différences de densité dans l'eau de mer ([Rahmstorf, 2002](#)) [16].

⁸ La circulation thermohaline, appelée aussi circulation océanique profonde, est la circulation océanique engendrée par les différences de densité (masse volumique) de l'eau de mer, à l'origine de courants marins de profondeur. Ces différences de densité proviennent des écarts de température et de salinité des masses d'eau.

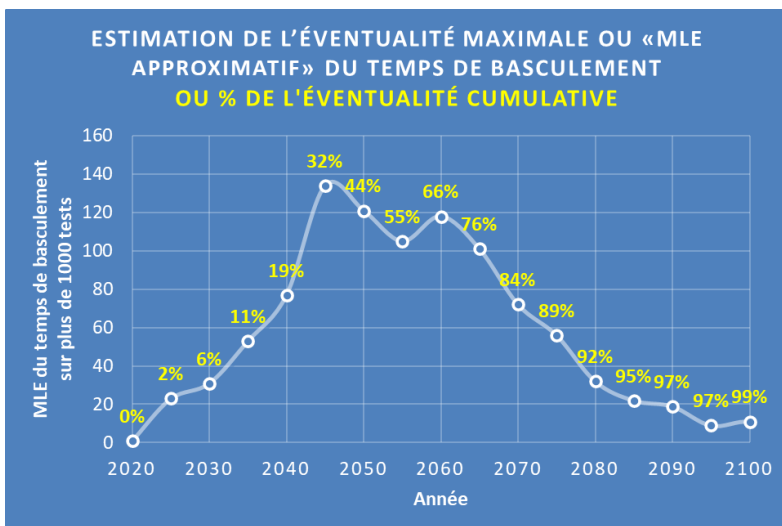


Figure 10 – Estimation du maximum de vraisemblance du temps de basculement sur 1 000 conditions d'essai. Source : Stéphane Bilodeau.

Dans l'Atlantique, l'eau riche en oxygène s'écoule à la surface en provenance de l'Antarctique à travers le golfe du Mexique, où elle prend beaucoup de chaleur en provenance de l'Atlantique Nord (rouge).

À cet endroit, elle se refroidit considérablement et s'enfonce dans les profondeurs de la zone dite de formation d'eau profonde (points jaunes) et s'écoule dans les profondeurs de la mer le long des sous-continent américains vers l'Antarctique (bleu), où le chemin rouge représente la circulation océanique près de la surface; le chemin bleu, la circulation de l'eau profonde et le chemin

violet, les courants de fond. Le gradient de salinité de surface est également représenté : vert > bleu clair > bleu.

3) La morts des récifs coralliens dans les basses latitudes : Les récifs coralliens sont parmi les écosystèmes les plus diversifiés de la planète. Ils sont également parmi les plus vulnérables au changement climatique. Le corail ne peut pas survivre lorsque l'eau devient trop chaude. Par exemple, les coraux de la barrière de corail dégradée de la Floride qui ont vu le jour autour de la dernière période glaciaire ont déjà perdu environ 98 % de leurs coraux à cause de l'eau polluée, des maladies, des températures anormales de l'océan, de la surpêche et d'autres impacts humains.

Auparavant, le manque d'ensembles de données génomiques longitudinales a nui à la compréhension de la façon dont ces événements de mortalité rapide modifient la structure génétique cryptique⁹. Mais une étude récente publiée dans [Science Advances](#) par des chercheurs des États-

⁹ La génétique cryptique est l'étude des variations génétiques cachées ou difficiles à détecter chez les organismes vivants. Ces variations peuvent être dues à des mutations, des recombinaisons, des transferts horizontaux de gènes ou des hybridations. La génétique cryptique peut avoir des implications importantes pour la compréhension et la conservation de la biodiversité, notamment dans le contexte des modifications des écosystèmes, notamment les changements environnementaux, tels que le réchauffement climatique, la fragmentation des habitats, la pollution, etc. La génétique cryptique peut révéler l'existence de complexes d'espèces cryptiques, c'est-à-dire des groupes d'espèces qui sont isolées, mais qui peuvent être plus vulnérables à l'extinction, car elles sont souvent méconnues ou confondues avec d'autres espèces plus communes.

Unis, d'Australie et du Canada a démontré que les vagues de chaleur marines amplifiées par le changement climatique peuvent entraîner une mortalité importante chez les espèces fondamentales. Les impacts des vagues de chaleur peuvent être exacerbés chez les espèces qui s'engagent dans des symbioses obligatoires, où la génétique de multiples taxons¹⁰ de partenaires coévolutifs¹¹ peut être affectée. [17, 18]

Le NOAA Satellite & Information Service (NESDIS) a publié ses *Four-Month Coral Bleaching Outlook – Heat Stress* (Perspectives de blanchiment des coraux, sur quatre mois, dû au stress thermique; c'est-à-dire qu'il est causé par l'augmentation des températures océaniques) [95, 96].

¹⁰ Un taxon est une entité conceptuelle qui regroupe tous les organismes vivants possédant en commun certains caractères taxinomiques ou diagnostiques bien définis. L'espèce constitue le taxon de base de la classification systématique. Plus le rang du taxon est élevé et plus le degré de ressemblance des individus concernés est faible.

¹¹ La coévolution décrit les transformations qui se produisent au cours de l'évolution entre deux espèces (coévolution par paire) ou entre plus de deux espèces (coévolution diffuse) à la suite de leurs influences réciproques. Les interactions de type coévolution jouent donc un rôle important dans le maintien de la biodiversité. Au sein d'une communauté, le changement d'une interaction affectera directement ou indirectement d'autres interactions. Cet impact se produit par effet domino et déstabilise les liens entre individus.

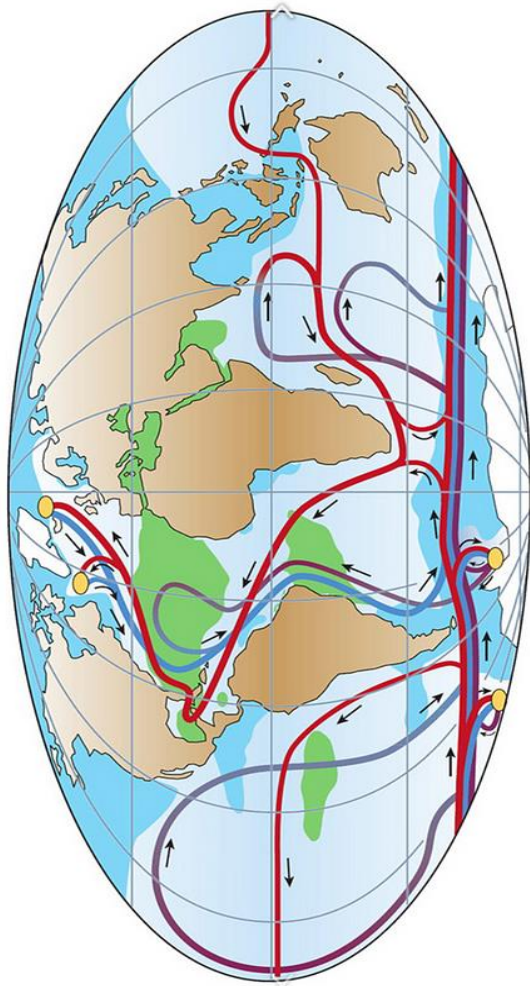


Figure 11 – Croquis simplifié de la thermohaline globale, dans laquelle les points jaunes représentent les régions de formation d'eau profonde; chemin rouge : circulation océanique près de la surface; chemin bleu : circulation de l'eau profonde, et chemin violet : courants de fond. Figure tirée de Rahmstorf, 2002 [16].

Les zones ombragées par les surfaces marron ont 90 % de chance de connaître un stress thermique de niveau d'alerte 2¹², c'est le plus haut niveau d'alerte de la NOAA, ce qui signifie qu'un blanchiment sévère des coraux et une mortalité importante sont probables. C'est une catastrophe en devenir, à tout le moins quelque chose de dramatique. (Voir figure 12 à la page 53)

4) Dégel soudain du pergélisol dans les régions du Nord : Le pergélisol est un sol gelé depuis au moins deux ans. Il couvre environ un quart des terres de l'hémisphère Nord. Si le pergélisol dégèle, il pourrait libérer de grandes quantités de CO₂ et de méthane (CH₄) dans l'atmosphère, ce qui accélérerait encore le réchauffement de la planète. [19, 20]

¹² Le niveau d'alerte de blanchiment (stress thermique) est basé sur une grille de données satellitaires Hotspot et ECS de blanchiment de corail mondiaux quotidiens (Source NOAA : <https://coralreefwatch.noaa.gov/> [96]). Les niveaux de stress thermique liés au blanchissement des coraux sont définis ci-dessous :

- Pas de stress (Hotspot ≤ 0);
- Surveillance de blanchiment ($0 < \text{Hotspot} < 1$);
- Blanchiment possible – Avertissement de blanchiment ($1 \leq \text{Hotspot}$ et $0 < \text{DHW} < 4$);
- Blanchiment sévère et important – **Alerte de blanchiment niveau 1** ($1 \leq \text{Hotspot}$ et $4 \leq \text{DHW} < 8$);
- Mortalité probable – **Alerte de blanchiment de niveau 2** ($1 \leq \text{Hotspot}$ et $8 \leq \text{DHW}$).

Le méthyl-mercure¹³ (MeHg) qui s'infiltré dans le pergélisol devient un problème lorsqu'il dégèle. Il y a quelques années, des scientifiques y ont fait la découverte de certains microbes avec un gène spécifique capable de convertir le mercure inorganique en méthyl-mercure toxique (MM toxique).

Cependant, certains microbes possèdent cette capacité de conversion en MM toxique tandis que d'autres ne la possèdent pas. Il s'est avéré difficile de corréler l'abondance de ces microbes avec le potentiel de méthylation du mercure au taux normal de MeHg dans l'environnement.

En conséquence, des scientifiques comme [Thomson et al. \[3\]](#), [Weatherall et coll. \[97\]](#), ou [Bieser et coll. \[19\]](#) ont utilisé des ensembles de données de la [grille GEBCO 2022](#), basée sur des modèles continus mondiaux de la surface des océans et des terres. Ces trois articles, publiés en 2023, ont théorisé que d'autres facteurs, tels que les relations complexes entre l'ensemble de la communauté des microbes dans le sol, jouent un rôle plus important dans le rythme de production de MeHg.

¹³ Le MeHg est une forme organique du mercure très toxique pour les organismes vivants. Il peut s'accumuler dans la chaîne alimentaire, notamment chez les poissons et les mammifères marins et présenter des risques pour la santé humaine.

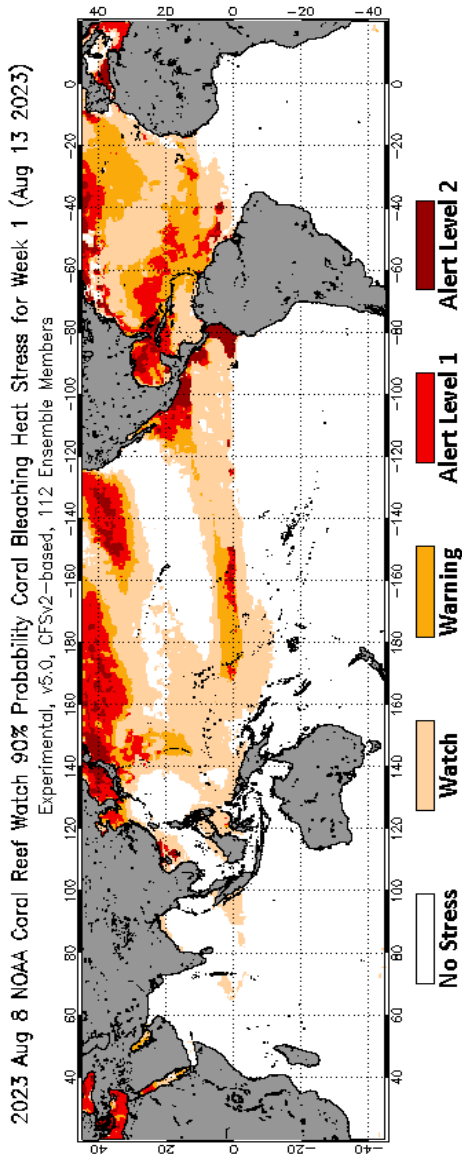


Figure 12 – Perspectives de blanchiment des coraux sur quatre mois – Stress thermique. Source NOAA : <https://coralreefwatch.noaa.gov/> [95].

Ces auteurs soulignent la nécessité de comprendre les impacts du changement climatique sur les processus de sources et de puits¹⁴ de MeHg afin d'en améliorer les projections de leurs concentrations futures dans les bassins versants du Nord. Ces impacts du changement climatique sur les processus de source et de puits de MeHg sont préoccupants, car ils peuvent augmenter la concentration de MeHg dans les écosystèmes aquatiques et terrestres, et peuvent ainsi affecter la biodiversité, la sécurité alimentaire et la santé publique. (Voir figure 13 à la page 55)

5) Intenses feux de forêt dans le monde entier :

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes, comme les ouragans, les feux de forêt et les vagues de chaleur, indique un changement climatique. Ces événements mettent en danger des vies et des infrastructures et perturbent les systèmes alimentaires et d'approvisionnement en eau, à un point tel que les humains ont du mal à s'adapter aux conséquences dans leurs vies et les entités publiques parviennent difficilement à les aider.

¹⁴ En biologie, une source est un processus qui émet des éléments dans l'environnement, tandis qu'un puits est un processus qui les absorbe ou les stocke. Ainsi, un puits de mercure retire le mercure de l'atmosphère ou de l'hydrosphère, et le stocke pendant une période plus ou moins longue. Par exemple, la végétation, les sols, les sédiments et les océans peuvent agir comme des puits de mercure, en absorbant ou en fixant le mercure sous différentes formes. Une source de mercure est un processus qui émet du mercure dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère, contribuant ainsi à sa dispersion dans l'environnement. Par exemple, les volcans, les zones géologiques riches en mercure, les feux de forêt ou les activités humaines, comme la combustion de charbon et l'extraction de métaux, sont des sources de mercure.

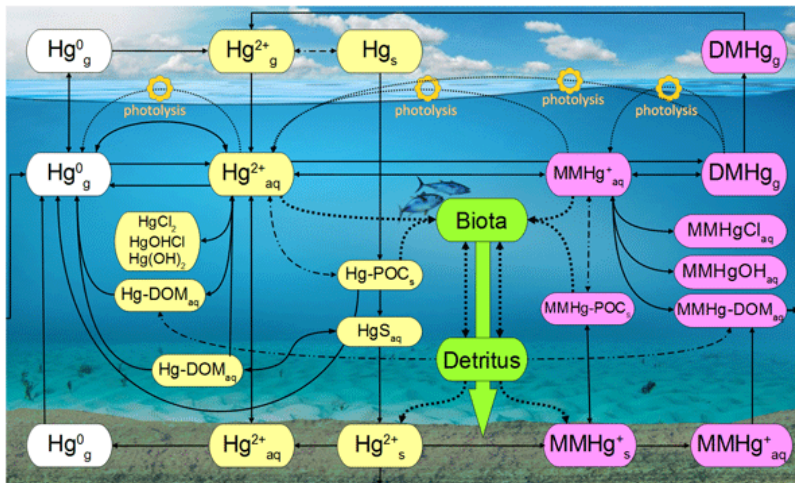


Figure 13 – Modèle 3D biogéochimique du cycle du mercure marin MERCY v2.0 – reliant le mercure atmosphérique au méthylmercure dans les poissons. Bieser et al. 2023 Data sets: The GEBCO_2022 Grid – a continuous lot model of the global oceans and land, GEBCO Compilation Group (2022) GEBCO_2022 Grid (doi:10.5285/e0f0bb80-ab44-2739-e053-6c86abc0289c) [100].

La NASA donne un aperçu des incendies et des anomalies thermiques qui se produisent quotidiennement dans le monde entier. Les données et les images d'incendie dérivées de satellites dans Worldview proviennent de l'instrument MODIS et de l'instrument VIIRS à bord des satellites Terra ou Aqua. Les données recueillies par les satellites utilisent un algorithme qui exploite la forte émission de rayonnement infrarouge moyen provenant d'incendies et d'anomalies thermiques, et ces données constituent une bonne indication de la présence des feux d'envergure. Ces incendies et anomalies thermiques sont représentés ici sous forme de points orange (MODIS) ou

rouges (VIIRS). [L'application NASA Worldview: Explore Your Dynamic Planet](#) fournit une perspective planétaire d'un satellite telle qu'elle est pour un jour précis et telle qu'elle l'a été dans le passé.

En 2022 et 2023, des événements climatiques extrêmes et notamment des feux de forêt gigantesques ont sévit dans le monde entier. Selon le [Global Forest Watch](#), de nombreux incendies se sont déclarés en janvier 2022 et 2023, ce qui est inhabituel pour cette période de l'année. On se souviendra du feu de forêt survenu en 2022 à Big Sur, en Californie. Au Canada, dès mars 2023, et avec une intensité accrue à partir de juin, les treize provinces et territoires du pays ont été touchés, les plus grands incendies ayant fait rage en Alberta, en Colombie-Britannique, en Nouvelle-Écosse, en Ontario et au Québec. En date du 10 septembre, 6 132 incendies avaient brûlé 16,5 millions d'hectares, soit environ 5 % de l'ensemble de la superficie forestière du Canada (voir figure 14 à la page 58). Pour mettre cela en perspective, c'est une zone plus grande que la superficie de la Grèce et plus du double du record canadien de 1989. Normalement, une moyenne de 2,5 millions d'hectares de terrain est consommée par les feux au Canada chaque année. Donc, ce qui a brûlé c'est près de 7 fois plus que la moyenne à long terme de 2,5 millions d'hectares (5,3 millions d'acres) pour cette période de l'année. [21]

Et contrairement aux années précédentes, les incendies de 2023 s'étendaient de la côte ouest des provinces de l'Atlantique et du Nord canadien. À la mi-juillet 2023, il y avait 29 méga-feux, chacun dépassant 100 000 hectares. Ces incendies ont causé des décès et des évacuations. Aux États-

Unis, en 2023, avec 50 % plus de feux de forêts que l'année précédente, il y a eu des feux majeurs en Arizona, en Californie, au Colorado, en Floride, en Idaho, au Kansas, au Michigan, au Minnesota, au Missouri, au Montana et au Nebraska, et plus tard en 2023, une étonnante conjonction de tempêtes et de feux de forêt a tué plus de 93 personnes à Hawaï.

Les feux de forêt au Canada en 2023 ont déjà libéré plus de 290 millions de tonnes de carbone, doublant un record annuel précédent, et les émissions devraient augmenter alors que des centaines de feux restaient encore actifs à travers le pays, selon le Service de surveillance atmosphérique Copernicus de l'Union européenne. Les émissions liées aux incendies au Canada représentent plus de 25 % du total mondial pour 2023, et elles sont bien au-dessus (soit plus du double) du précédent record canadien de 138 millions de tonnes enregistrées en 2014.

En plus de libérer des émissions de CO₂, les incendies émettent souvent d'énormes quantités de fumée, ce qui peut causer des problèmes de qualité de l'air. La couche d'indice d'aérosol de la série de cartographies et de profileurs de l'ozone (OMPS) de Suomi NPP aide à identifier les zones de grandes quantités d'aérosols dans l'atmosphère. La fumée des feux de forêt canadiens a recouvert plusieurs grandes villes cette année, dont New York et Toronto, et a incité les autorités de santé publique à émettre des alertes sur la qualité de l'air. La fumée des feux de forêt est liée à des taux plus élevés de crises cardiaques, d'accidents vasculaires cérébraux et à un plus grand nombre de visites aux salles d'urgence pour des affections respiratoires.

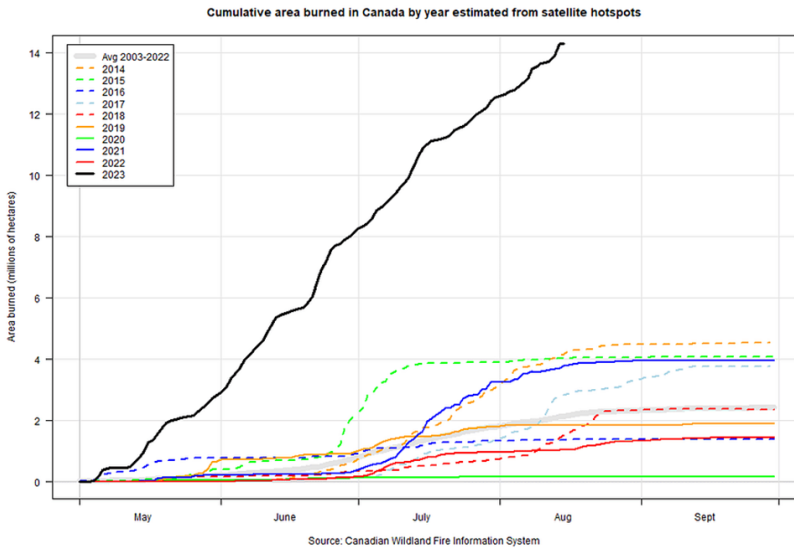


Figure 14 – Points chauds rapportés par Canada Fire depuis le début de saisons. Source : Ressources naturelles Canada; Service canadien des forêts, 2022. Système canadien d'information sur les feux de végétation (SCIFV), Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton, Alberta. <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca>. Métadonnées du Mini-entrepôt de données du SCIFV <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/datamart/metadata/fm3buffered>.

6) Intenses et persistantes vagues de chaleur : Les vagues de chaleur sont divisées en deux domaines d'activités principaux, à savoir sur terre et sur mer. Premièrement, les surfaces mondiales et, deuxièmement, la hausse des températures de l'océan.

6.1. Augmentation marquée des températures de surface globale : Des événements climatiques extrêmes dans le monde entier ont marqué l'été 2022. La température mondiale de la surface des terres et des océans en juin-août 2022 était de 0,89 °C au-dessus de la moyenne du 20^e siècle, de 15,6 °C, à égalité avec 2015 et 2017, et cette période était alors considérée comme étant l'été le plus chaud jamais enregistré. La température de surface mondiale de janvier à juillet s'est classée au troisième rang des températures les plus chaudes du record de 174 ans, soit 1,03 °C au-dessus de la moyenne de 13,8 °C de 1901 à 2000.

Juillet 2023 a été le mois le plus chaud jamais enregistré dans le monde et a battu plusieurs records quotidiens au cours du mois. Selon le Copernicus Climate Change Service, juillet a été le mois le plus chaud jamais enregistré, avec une chaleur intense brûlant l'Europe, l'Afrique du Nord, l'Antarctique et l'Amérique du Sud, alors que c'est en hiver (voir figure 15 à la page suivante).

Le mois de juillet 2023 a commencé par un record mondial quotidien de température moyenne de l'air de surface, battu quatre jours de suite, du 3 au 6 juillet. Tous les jours du reste du mois de juillet ont été plus chauds que le précédent record de 16,80 °C, établi le 13 août 2016, faisant des 29 jours du 3 au 31 juillet les plus chauds jamais enregistrés. Le graphique de Copernicus de la figure 15 montre explicitement que l'été 2023 a dépassé le 1,5 °C au-dessus de la période 1850-1900.

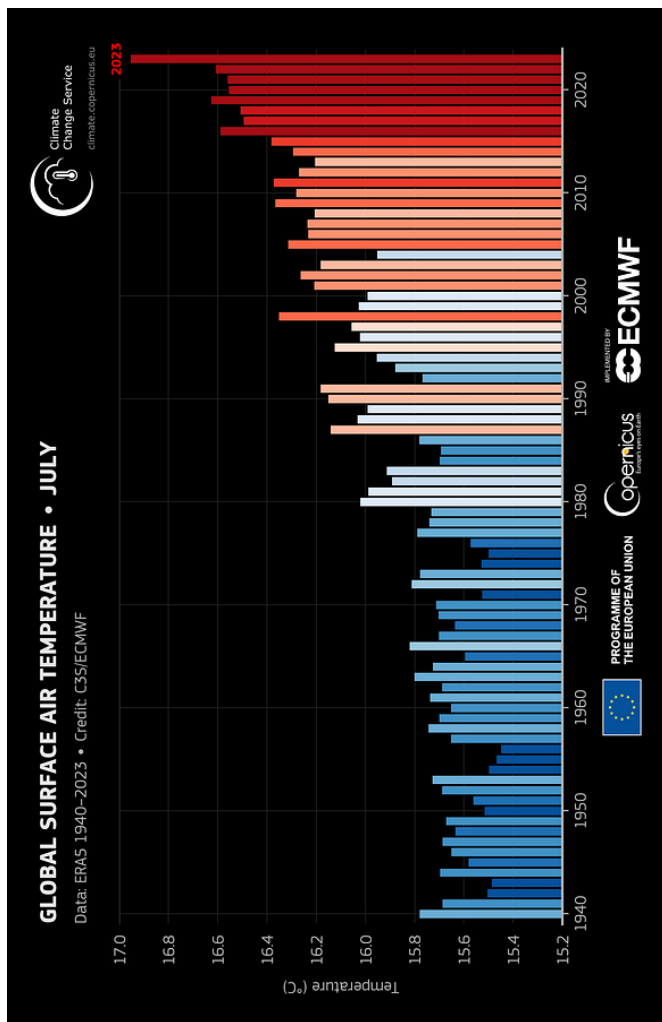


Figure 15 – Température moyenne de l'air de surface à l'échelle mondiale pour tous les mois de juillet de 1940 à 2023. Les nuances de bleu indiquent des années plus fraîches que la moyenne, tandis que les nuances de rouge montrent des années plus chaudes que la moyenne. Données : ERA5. Crédit : C3S/CEPMMT.
<https://climate.copernicus.eu/year-review-c3s-milestones-2023>.

Dans le graphique de la figure 16, page suivante, la température quotidienne de l'air à la surface mondiale (en °C) du 1^{er} janvier 1940 au 31 juillet 2023 est tracée sous forme de séries chronologiques pour chaque année. Les années 2023 et 2016 sont représentées par des lignes épaisses ombragées, respectivement en rouge vif et en rouge foncé. Les autres années sont montrées avec des lignes fines et ombragées en fonction de la décennie, des années 1940 (bleu) aux années 2020 (rouge brique). À titre de référence, la ligne pointillée et la zone grise représentent le seuil de 1,5 °C au-dessus du niveau préindustriel (1850-1900). On observe donc que les températures de 2023 ont déjà atteint cette zone « à ne pas dépasser » suivant les objectifs de l'Accord de Paris.

6.2. Température record des océans : Même les océans du monde n'ont pas été épargnés, connaissant des températures de surface records en Méditerranée et dans l'Atlantique Nord, décimant les systèmes de récifs coralliens et menaçant la vie marine.

La température moyenne à la surface de l'océan a atteint 20,96 °C à la fin du mois de juillet 2023, selon les données modernes du Service Copernicus sur le changement climatique de l'Union européenne, battant le précédent record de 20,95 °C établi en 2016. Les scientifiques disent alors que le monde doit se préparer à ce que les températures de l'océan continuent d'augmenter, alors qu'au réchauffement climatique causé par l'homme s'ajoute l'arrivée d'El Niño, à savoir cette fluctuation climatique naturelle qui prend naissance dans l'océan Pacifique tropical et qui a un impact sur le réchauffement global.

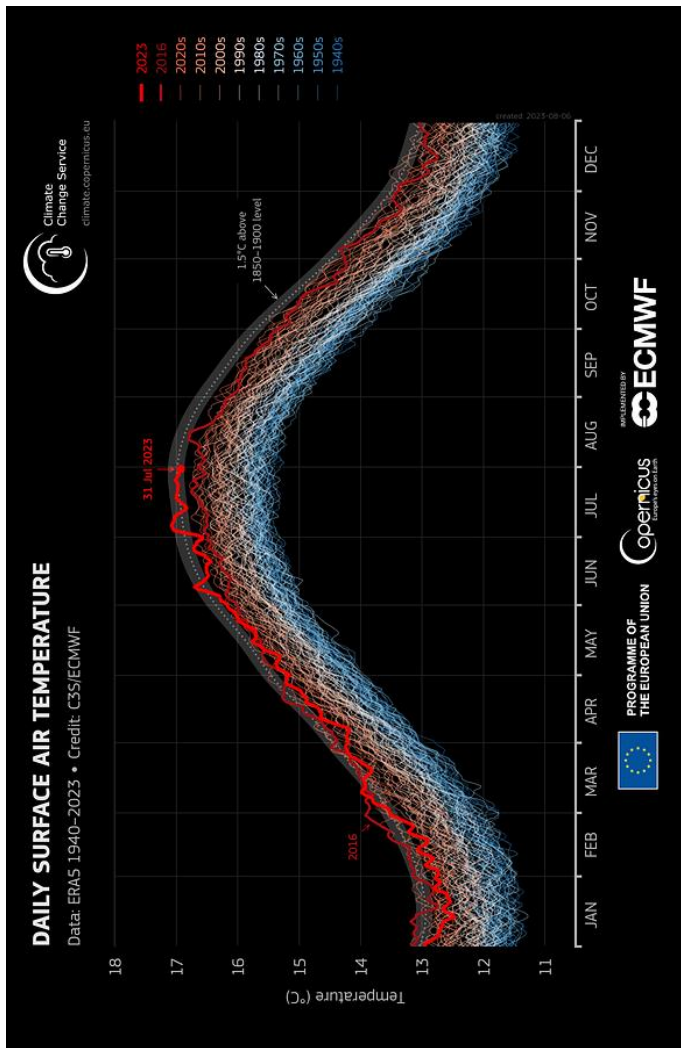


Figure 16 – Températures quotidiennes de l'air à la surface du monde (°C) du 1^{er} janvier 1940 au 31 juillet 2023, représentées sous forme de séries chronologiques pour chaque année. 2023 et 2016 sont respectivement représentées avec des lignes épaisses ombragées en rouge vif et en rouge foncé. Données : ERA5. Crédit : C3S/CEPMMT.

Dans les Florida Keys, une vague de chaleur marine a poussé les températures de l'océan à des niveaux records de remsous marins, laissant plusieurs récifs coralliens complètement blanchis ou morts. En juin 2023, une vague de chaleur « totalement sans précédent » dans l'Atlantique Nord au large des côtes du Royaume-Uni et de l'Irlande est définie comme « extrême » par la NOAA, se manifestant par des températures jusqu'à 5 °C (9 °F) plus chaudes que d'habitude, suscitant des inquiétudes quant aux impacts sur la vie marine. A aussi eu lieu un blanchiment catastrophique des récifs coralliens des îles de la Société, en Polynésie française.

Les températures de l'océan sont hors des cadres en 2023 (figure 17, à la page 64), et les scientifiques sont alarmés : les températures de la surface de la mer en 2023 ont été exceptionnellement et anormalement chaudes, apportant des implications de grande envergure, en particulier pour les écosystèmes complexes tels que les récifs coralliens. De plus, l'eau de mer plus chaude a également un impact climatique. Les océans jouent un rôle vital en tant que tampon contre les crises climatiques en absorbant la pollution causée par le réchauffement de la planète. L'eau plus chaude le fait moins efficacement, ce qui signifie qu'il reste plus de carbone dans l'atmosphère, alimentant d'autant plus le réchauffement climatique.

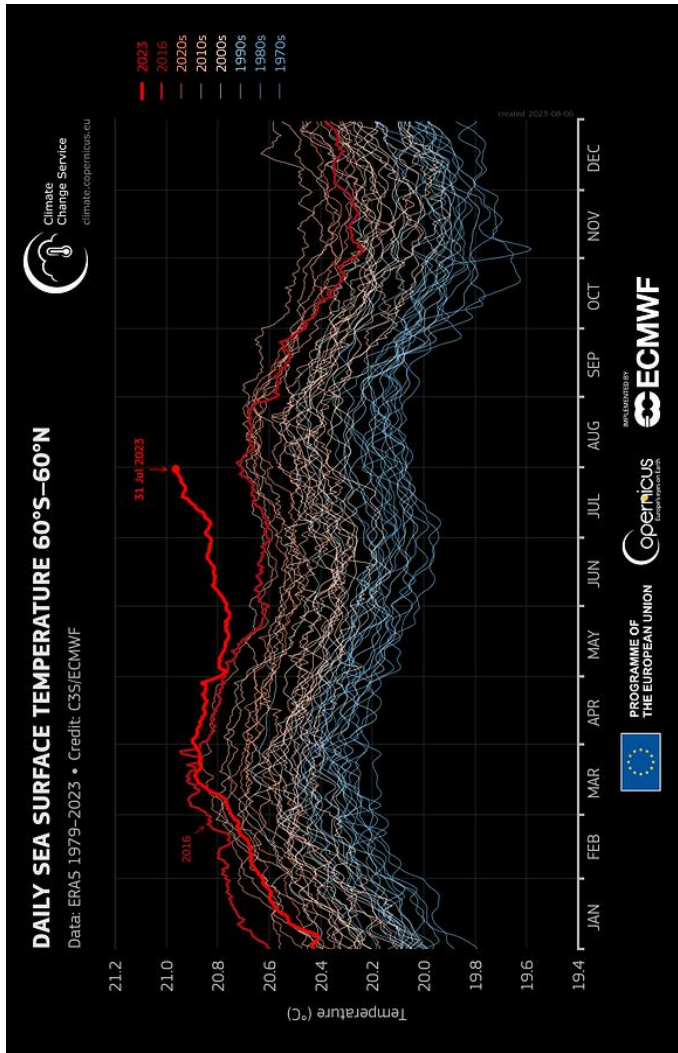


Figure 17 – Températures quotidiennes mondiales de surface de la mer (°C) du 1^{er} janvier 1979 au 31 juillet 2023, tracées sous forme de séries chronologiques pour chaque année. Les températures de 2023 et de 2016 sont représentées avec des lignes épaisses ombragées respectivement en rouge vif et en rouge foncé. Données : ERA5. Crédit : C3S/CEPMMT.

En conclusion du chapitre, nous venons de voir six catégories de points de bascule. La première, plus souvent abordée, correspond à un groupe de trois points de bascule climatiques liés à la fonte des glaces de l'Arctique (dont les effondrements des deux derniers inlandsis ou la perte abrupte de glace dans la mer de Barents). Les autres ne sont pas moins importants, qu'il s'agisse de l'effondrement de l'AMOC, de la mort des récifs coralliens dans les basses latitudes ou du dégel soudain du pergélisol dans les régions du Nord et des intenses feux de forêt dans le monde entier. Toutefois, les deux points de bascule qui entraînent des répercussions directement sur l'ensemble de la planète sont définitivement les intenses et persistantes vagues de chaleur et l'augmentation marquée des températures de surface globale et des océans.

L'ensemble de ces événements entraîne des conséquences graves pour le climat et les écosystèmes mondiaux, notamment :

- L'augmentation du niveau de la mer, en diluant l'eau de mer avec de l'eau douce issue de la fonte de la glace;
- La perturbation de la circulation océanique, en modifiant le contraste de salinité et de densité entre les eaux polaires et tropicales;
- La modification des régimes météorologiques, en affectant la pression atmosphérique, les vents, les précipitations et les tempêtes;
- La biodiversité et les écosystèmes (et en particulier les écosystèmes marins), en réduisant l'habitat et la

disponibilité de la nourriture pour de nombreuses espèces.

L'objectif du chapitre était d'approfondir les principaux risques concernant chacun de ces points de bascule. Nous pouvons en retenir que les données montrent déjà que ces CTP se rapprochent ou seront franchis de manière imminente et leurs conséquences seront de différentes natures sur tout le globe, et cela, beaucoup plus rapidement que prévu, faisant que leur urgence est sous-estimée.

Chapitre 3

Principaux points de bascule non climatiques

Points de bascule structurels non climatiques

La première série de points de bascule (dont il était question dans le chapitre précédent) se rapporte principalement au changement climatique (ce sont des CTP). Mais quatre autres ensembles, qui sont non climatiques et que nous nous apprêtons à voir, sont cruciaux pour l'humanité, bien que plus complexes dans leur portée. Leurs causes intrinsèques pourraient être déclenchées par des CTP. De plus, ce sont des points de bascule structurels. Bien que ces points de bascule ne soient pas d'ordre climatique, leur impact n'en est pas moins vital pour l'écosystème terrestre et l'humanité en particulier.

Pour bien comprendre l'aspect structurel de ces points de bascule, pensons aux nombreuses régions du monde qui connaissent déjà une pénurie d'eau en raison de la surextraction, de la pollution et de l'épuisement des aquifères. Cette situation affecte à la fois l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation agricole. Le pompage excessif des eaux souterraines des aquifères, souvent plus rapidement qu'ils ne peuvent se recharger, entraîne un épuisement à long terme des ressources en eau.

Cette situation menace la durabilité des sources d'eau pour les communautés et l'agriculture. [88]

Les points de bascule structurels et les CTP peuvent s'influencer les uns les autres, créant des effets en cascade et des rétroactions positives ou négatives.

Par exemple, selon un rapport de l'UNESCO publié en 2022, la surexploitation des aquifères accroît la vulnérabilité des ressources en eau potable en raison de la rareté de l'eau pendant les cycles de sécheresse, ce qui oblige souvent à s'approvisionner en eau dans des régions plus éloignées, avec une augmentation conséquente du prix. La surexploitation des eaux souterraines peut aussi provoquer l'intrusion d'eau salée, la subsidence du sol, la dégradation de la qualité de l'eau, la perte de biodiversité et la réduction de la capacité de stockage du carbone. [55]

En conséquence, une surextraction des eaux des aquifères peut exacerber une sécheresse en cours dans une région affectée par le réchauffement climatique, lequel peut à son tour amplifier la surexploitation des aquifères restants, et ainsi de suite, jusqu'à l'épuisement de la ressource. Cet exemple illustre un cercle vicieux, entre la surexploitation des eaux souterraines, la sécheresse et le changement climatique, qui peut entraîner des conséquences néfastes sur la disponibilité et la qualité de l'eau, la sécurité alimentaire, la santé, l'environnement et le développement. Il convient donc de prendre en compte ces interactions complexes et incertaines pour évaluer plus justement les risques et les

opportunités liés au changement climatique et aux systèmes socio-économiques et écologiques.

Les points de bascule structurels identifiés ci-après pourraient directement affecter les infrastructures, qui constituent l'« ossature » même de notre société, et nécessiteraient une étude plus approfondie concernant leur probabilité de se produire ainsi que leurs conséquences :

- 1) Points de bascule alimentaires :
 - a. Perte de biodiversité;
 - b. Acidification des océans;
- 2) Dégradation des sols;
- 3) Points de bascule de l'eau;
- 4) Épuisement de l'aquifère.

Nous allons maintenant passer en revue ces points de bascule structurels en mettant en relief leurs aspects critiques à travers les impacts engendrés par leur déséquilibre.

*Points de bascule alimentaires*¹⁵

Les points de bascule alimentaires se composent des aspects de la perte de biodiversité et de l'acidification des océans, car il s'agit de deux facteurs déterminants de la

¹⁵ Les points de bascule alimentaires auront des impacts directs sur la chaîne alimentaire dès leur déclenchement.

disponibilité alimentaire faunique et végétale, terrestre et océanique.

Perte de biodiversité

Le déclin de la biodiversité affecte la résilience des systèmes agricoles. Un exemple éloquent est celui de la pollinisation, qui est un service écosystémique essentiel pour la production agricole. La pollinisation dépend de la diversité des espèces animales, telles que les abeilles, les papillons, les oiseaux, etc., qui transportent le pollen entre les fleurs. Le déclin de la biodiversité, causé par la perte d'habitat, les pesticides, le changement climatique, etc., réduit le nombre et la variété des pollinisateurs, ce qui affecte la fécondation, la qualité et le rendement des cultures. Selon une étude publiée dans la revue *Science*, la production de 75 % des cultures alimentaires mondiales dépend de la pollinisation animale, et la valeur économique de ce service est estimée entre 235 et 577 milliards de dollars par an [112].

La réduction de la pollinisation peut donc entraîner des conséquences négatives sur la sécurité alimentaire, la nutrition, la santé et le revenu des agriculteurs. Inversement, pour renforcer la résilience des systèmes agricoles face au déclin de la biodiversité, il faut promouvoir des pratiques agroécologiques, qui favorisent la conservation et la restauration des habitats des pollinisateurs, comme les haies, les bandes fleuries, les jachères, etc. C'est que les pesticides, la perte d'habitat et le changement climatique menacent les pollinisateurs et les espèces essentielles (notamment les

céréales) et ils ont un impact sur les rendements des cultures et sur la sécurité alimentaire. [22, 23, et 56]

« Les preuves accablantes fournies par l'[évaluation mondiale de l'IPBES](#)¹⁶, provenant d'un large éventail de différents domaines de connaissances, présentent un tableau inquiétant » [57], a déclaré le président de l'IPBES, Sir Robert Watson.

« La santé des écosystèmes dont nous et toutes les autres espèces dépendons se détériore plus rapidement que jamais. Nous érodons les fondements mêmes de nos économies, de nos moyens de subsistance, de la sécurité alimentaire, de la santé et de la qualité de vie dans le monde entier. » [57]

¹⁶ L'IPBES est l'acronyme de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques, qui est un organisme indépendant créé en 2012 pour fournir des informations et des conseils aux décideurs sur les questions liées à la biodiversité et aux services écosystémiques. L'évaluation mondiale de l'IPBES est un rapport scientifique des travaux réalisés par près de 150 experts de 50 pays, assistés par 350 auteurs contributeurs, pour évaluer l'état et les tendances de la biodiversité et des services écosystémiques à l'échelle mondiale, ainsi que leurs impacts sur le bien-être humain et les réponses possibles.

Acidification des océans

Les scientifiques anticipent un effondrement trophique¹⁷ en cascade de l'ensemble de l'écosystème marin à mesure que le pH océanique s'approchera de 7,95 d'ici 2045 (selon le GIEC), ce qui entraînera un dérèglement climatique dramatique et un effondrement de l'écosystème mondial sur terre et dans les océans.

L'effondrement trophique en cascade de l'écosystème marin dû à l'acidification des océans se produira lorsque la diminution du pH de l'eau de mer aura fait décliner les populations d'organismes marins, en particulier ceux qui produisent des coquilles ou des squelettes en carbonate de calcium, comme les coraux, les mollusques, les crustacés ou les échinodermes. Ces organismes sont en effet essentiels pour le maintien de la structure et de la diversité des écosystèmes marins, car ils fournissent un habitat, de la nourriture et de la protection à de nombreuses autres espèces. [38, 110]

¹⁷ Le terme « trophique » vient du grec « trophe », qui signifie nourriture ou nutrition. Il désigne ce qui est relatif à l'alimentation des êtres vivants et à la circulation de l'énergie et de la matière entre les différents niveaux d'un réseau alimentaire. Chaque niveau d'un réseau alimentaire est désigné de niveau trophique. Une cascade trophique est un phénomène écologique qui se produit lorsque les interactions entre les prédateurs et les proies affectent l'abondance, la biomasse ou la productivité de plus d'un niveau trophique. L'effondrement trophique est une répercussion en chaîne sur les niveaux trophiques supérieurs et inférieurs.

L'acidification des océans réduit la disponibilité des ions carbonates nécessaires à la formation des coquilles et des squelettes, ce qui rend ces organismes plus vulnérables à la dissolution, à la prédation, aux maladies et au stress environnemental. Lorsque ces organismes sont affectés par l'acidification des océans, ils peuvent entraîner une cascade trophique. Par exemple, la mort des coraux peut provoquer la perte de la biodiversité et de la productivité des récifs coralliens, qui abritent plus d'un quart de toutes les espèces marines.

Cet accroissement de l'acidité des océans peut réduire les ressources alimentaires et les opportunités de reproduction pour les poissons et les invertébrés, qui dépendent des récifs, ce qui peut affecter les prédateurs supérieurs, comme les requins, les dauphins ou les tortues. Ce phénomène peut aussi avoir des impacts socioéconomiques sur les populations humaines qui bénéficient des services écosystémiques fournis par les récifs, comme la pêche, le tourisme, la protection côtière ou la régulation du climat. De même, la diminution des populations de mollusques, de crustacés ou d'échinodermes peut aussi provoquer une cascade trophique, car ces organismes sont des proies importantes pour de nombreux prédateurs marins, comme les oiseaux, les mammifères, les poissons ou les céphalopodes. Ces impacts peuvent réduire la biomasse et la diversité des niveaux trophiques supérieurs, pouvant affecter le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes marins. De plus, ils peuvent aussi entraîner des conséquences socioéconomiques sur les secteurs qui exploitent ces

ressources, comme l'aquaculture, la pêche ou la conchyliculture.¹⁸

Deux autres éléments cruciaux pourraient être affectés par cette acidification, qui toucherait à la fois le climat et la quantité relative d'activité biologique¹⁹ (et la biodiversité, comme expliqué ci-dessus). Premièrement, les aérosols marins jouent un rôle essentiel dans l'impact sur notre climat par leur effet sur la formation des nuages au-dessus des océans. L'activité biologique dans l'océan influence la production et la composition des aérosols marins. C'est que ces aérosols marins peuvent contenir de la matière organique issue du phytoplancton, des bactéries, des virus, etc., qui modifient les propriétés optiques, chimiques et physiques des nuages, ainsi que la diffusion de la lumière solaire et la régulation du cycle du carbone. Une étude récente publiée en 2021 par des chercheurs de l'Université de Californie montre clairement une forte corrélation entre

¹⁸ La conchyliculture est l'élevage de coquillages, qui est une forme d'aquaculture. La conchyliculture concerne principalement l'élevage de mollusques marins, comme les huîtres, les moules, les palourdes, etc. Elle peut se pratiquer en mer, en étang, en rivière ou en bassin.

¹⁹ La quantité relative d'activité biologique est une mesure qui compare l'activité d'une enzyme ou d'un micro-organisme dans des conditions données à son activité maximale dans des conditions optimales. Elle permet d'évaluer l'influence de différents facteurs, comme la température, le pH, la concentration du substrat, etc., sur la vitesse de la réaction catalysée ou du processus biologique. La quantité relative d'activité biologique se calcule en divisant l'activité observée par l'activité maximale, et en multipliant le résultat par 100 pour obtenir un pourcentage. Par exemple, si une enzyme a une activité de 40 unités à 25 °C et de 80 unités à 37 °C, sa quantité relative d'activité biologique à 25 °C est de $40/80 \times 100 = 50 \%$.

les concentrations de chlorophylle-a dans l'eau de mer et les aérosols marins secondaires (c'est-à-dire affectant la photosynthèse et le processus naturel de capture du carbone associé au phytoplancton). Cette étude a examiné la formation des aérosols organiques à la surface de l'océan, en fonction de l'activité biologique et des paramètres météorologiques. Ils ont utilisé un détecteur développé au laboratoire pour suivre les émissions d'aérosols de l'océan dans différentes régions du monde. Ils ont trouvé que la concentration de chlorophylle-a dans l'eau influençait la composition organique des particules d'aérosol. [28]

C'est que, par la photosynthèse, les plantes et les animaux planctoniques océaniques sont essentiels à la régulation de notre climat, et bien plus; notamment la production d'oxygène à la base de tant de processus nécessaires à la vie²⁰. Cette clé de voûte du plus grand écosystème de la planète qu'est la photosynthèse est déjà affectée par la hausse des températures et l'acidification des océans. Il ne faut donc surtout pas l'ignorer, puisque ce processus est un des outils essentiels pour lutter contre le changement climatique.

Il importe de souligner que, malgré l'importance des aérosols marins et de leur lien avec le changement climatique, ils ont des effets complexes et ambigus sur le climat, en fonction de leur composition, de leur taille, de leur distribution et de leur interaction avec les nuages. Les

²⁰ Chaque seconde respiration que nous prenons provient de la photosynthèse marine, un processus qui capture et utilise également de 60 % à 90 % de notre dioxyde de carbone (CO₂).

aérosols marins sont des particules liquides ou solides en suspension dans l'air, qui proviennent principalement des embruns marins, des éruptions volcaniques, des feux de biomasse ou des activités humaines. Les aérosols marins secondaires²¹ peuvent aussi affecter la qualité de l'eau, car ils modifient le pH, la salinité et la turbidité²² de l'eau. Par exemple, les aérosols de sulfate peuvent acidifier l'eau de mer, ce qui réduit la disponibilité des ions carbonates nécessaires à la formation des coquilles et des squelettes de certains organismes marins, comme les coraux, les mollusques ou les foraminifères. Cet impact peut à son tour affecter la biodiversité et la structure des écosystèmes marins, et donc le cycle du carbone océanique. Inversement, les aérosols organiques peuvent augmenter la salinité et la turbidité de l'eau de mer, ce qui réduit la pénétration de la lumière, et donc la photosynthèse du phytoplancton.

²¹ Les aérosols marins secondaires sont des particules qui se forment dans l'atmosphère à partir de la réaction chimique de composés organiques volatils (COV) émis par le phytoplancton. Le phytoplancton se compose de l'ensemble des organismes végétaux microscopiques qui vivent dans les eaux de surface des océans et qui réalisent la photosynthèse, c'est-à-dire la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique, en utilisant le CO₂ dissous dans l'eau et en produisant de l'oxygène. Le phytoplancton joue un rôle essentiel dans le cycle du carbone océanique, car il capture une partie du CO₂ atmosphérique et le stocke sous forme de matière organique, qui peut ensuite être consommée par le zooplancton ou s'enfoncer dans les profondeurs.

²² La turbidité est une caractéristique optique de l'eau, qui mesure sa capacité à diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est influencée par la présence de particules en suspension, d'origine minérale ou organique, dans l'eau. Elle affecte également la couleur, la température, l'oxygénation et la photosynthèse de l'eau.

Les aérosols marins secondaires qui se forment à partir de la réaction chimique de composés organiques volatils (COV) émis par le phytoplancton, qui réalise la photosynthèse et le processus de capture du carbone dans les océans, ont, par ricochet, un impact sur la photosynthèse et le processus de capture du carbone associé au phytoplancton. C'est qu'ils peuvent modifier le climat et la qualité de l'eau, et donc la croissance, la production et la diversité du phytoplancton. Cette modification peut avoir des impacts négatifs sur la biodiversité, la productivité, le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes marins, ainsi que sur les services écosystémiques que les aérosols fournissent aux populations humaines. Or, il s'agit de répercussions en chaîne, sur les niveaux trophiques supérieurs et inférieurs, déclenchées par un effondrement trophique.

Toutefois, même si les aérosols marins peuvent amplifier le réchauffement climatique induit par les GES, ils peuvent aussi l'atténuer suivant leur nature et leur quantité. Reste que les effets des aérosols marins sur le climat sont encore mal connus et incertains, car ils dépendent de nombreux facteurs physiques, chimiques et biologiques, qui varient dans le temps et dans l'espace.

Toutefois, en ce qui touche les aérosols marins secondaires, leur impact est beaucoup plus clair et marqué. Les aérosols secondaires organiques, qui sont produits par l'oxydation de l'isoprène²³ émis par le phytoplancton, ont un

²³ « Isoprène » est un synonyme commun du composé chimique 2-méthylbuta-1,3-diène. L'isoprène est le monomère du caoutchouc

effet réchauffant, car ils absorbent le rayonnement solaire et réduisent l'albédo des nuages.²⁴

Le changement climatique induit par les aérosols marins secondaires peut affecter la photosynthèse et le processus de capture du carbone associé au phytoplancton, en modifiant la température, la luminosité et la stratification de l'eau. Par exemple, un refroidissement de la surface de l'eau peut favoriser le mélange vertical de l'eau, ce qui augmente la disponibilité des nutriments et du CO₂ pour le phytoplancton, et donc aussi sa croissance et sa production de COV. À l'inverse, un réchauffement de la surface de l'eau peut renforcer la stratification de l'eau, ce qui limite l'apport de nutriments et de CO₂ pour le phytoplancton, ainsi que sa croissance et sa production de COV.

naturel, mais il est aussi produit naturellement par de nombreux végétaux, notamment le phytoplancton, en réponse à certains stress environnementaux. L'oxydation de l'isoprène est une réaction chimique qui transforme l'isoprène, un hydrocarbure gazeux produit par le phytoplancton, en d'autres composés organiques plus oxygénés, tels que les époxydes, les aldéhydes, les cétones, les alcools ou les acides. Cette réaction est initiée par des agents oxydants présents dans l'atmosphère, comme l'ozone, les radicaux hydroxyles ou les radicaux nitrates. L'oxydation de l'isoprène a des implications importantes pour la chimie atmosphérique, car elle modifie la concentration et la réactivité des COV, ainsi que la formation et la propriété des aérosols organiques secondaires.

²⁴ L'albédo est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi vers l'espace par une surface ou un milieu. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. L'albédo des nuages est la fraction de l'énergie solaire qui est réfléchi par les nuages. Il dépend de la forme, de la taille, de la composition et de la distribution des gouttelettes ou des cristaux qui composent les nuages. L'albédo des nuages varie entre 0,5 et 0,8 en moyenne.

De plus, le plancton marin, qui est non seulement un élément important de la biodiversité, mais qui est également considéré comme le poumon du système de survie de la planète et de la terre, a perdu 50 % de sa biomasse depuis que le déclin de 1950²⁵ se poursuit au rythme de 1 % par année (voir la figure 18 à la page suivante, qui illustre le lien entre le pH des océans et le déclin de sa biodiversité; la ligne rouge correspond au déclin annuel de 1 %). Compte tenu de ces résultats, les études futures doivent porter sur les facteurs physiques, chimiques et biologiques des points de bascule qui auraient une incidence sur la vie marine. [59]

On vient donc de voir en détail les points de bascule liés à l'alimentation, il reste trois autres points de bascule cruciaux et structurels à explorer, à savoir, le point de bascule de la dégradation des sols, celui de l'eau et celui de l'épuisement de l'aquifère.

²⁵ Le déclin du phytoplancton est un phénomène préoccupant qui affecte l'écosystème marin et le climat. Le phytoplancton est un ensemble de micro-organismes végétaux qui vivent à la surface des océans et qui sont à la base de la chaîne alimentaire marine. Il produit aussi la moitié de l'oxygène terrestre et absorbe une partie du dioxyde de carbone atmosphérique. Selon une étude publiée dans la revue *Nature* en 2010 [59], la masse de phytoplancton a diminué d'environ 40 % depuis 1950, à un rythme moyen de 1 % par an. Cette baisse serait liée au réchauffement des océans, qui entraîne une stratification des couches d'eau et limite la remontée des nutriments vers la surface. Le phytoplancton se trouve ainsi privé de lumière et de nourriture, ce qui réduit sa croissance et sa productivité.

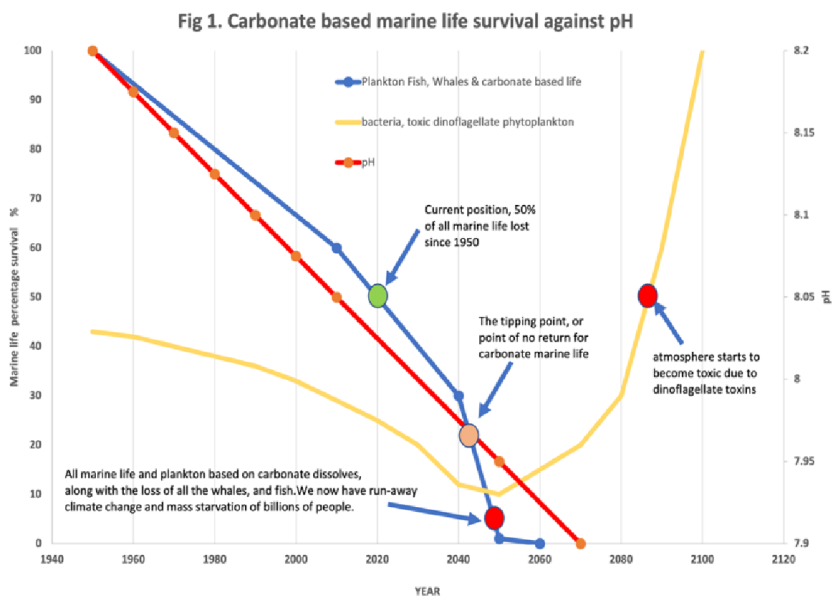


Figure 18 – Survie de la vie marine à base de carbonate selon le pH. Vous trouvez ci-dessus un élément clé pour expliquer les observations de l'équipe GOES. Il réunit le pH et la perte de biodiversité et éclaire la prédiction d'un point de bascule du pH. De Dryden et Duncan (2022).

Dégradation des sols

L'érosion, l'épuisement et la contamination des sols constituent une menace importante pour la production alimentaire mondiale. Des sols sains sont essentiels au maintien de l'agriculture, et leur dégradation peut entraîner une réduction des rendements et des carences en nutriments. Le point de bascule de la dégradation des sols correspond au niveau de dégradation au-delà duquel le sol perd irrémédiablement sa capacité à fournir des biens et services

écosystémiques, tels que la production alimentaire, la régulation du climat, le stockage du carbone, la filtration de l'eau ou la biodiversité. Ce point de bascule peut être atteint par des processus tels que l'érosion, l'épuisement, la contamination, la compaction, l'hydromorphie, l'encroûtement ou la salinisation des sols, tous ces processus sont causés ou aggravés par des facteurs naturels (climat, relief, sol) ou anthropiques (déforestation, agriculture intensive, urbanisation, pollution, etc.) [60]. Ils affectent la structure, la composition, la fonction et la productivité des sols, en diminuant leur capacité à fournir des biens et services écosystémiques. Plus spécifiquement, la santé des sols est menacée par des processus de dégradation physique, chimique et biologique.

Parmi les biens et services écosystémiques, on peut citer la production alimentaire, la régulation du climat, le stockage du carbone, la filtration de l'eau ou la biodiversité. Dépasser un seuil critique de dégradation des sols, c'est franchir un point de bascule à partir duquel le sol perd définitivement sa capacité à remplir ses fonctions. Les impacts du franchissement de ce point de bascule peuvent avoir des impacts négatifs irréversibles sur la sécurité alimentaire, la santé humaine, le climat et l'environnement. Les causes de la dégradation des sols sont donc multiples et complexes, puisqu'elles impliquent des facteurs naturels et anthropiques.

Pour lutter contre la dégradation des sols, il faut adopter des pratiques de gestion durable des sols, qui visent à préserver, restaurer et améliorer les fonctions et les services

des sols, tout en respectant les besoins socio-économiques des populations.

Points de bascule de l'eau de surface

De nombreuses régions du monde connaissent une pénurie d'eau en raison de la surextraction des eaux de surface (rivières, lacs, réservoirs, etc.) et du changement climatique, mais aussi de la pollution ou de la contamination des réserves d'eau existantes. Les pénuries d'eau affectent à la fois l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation agricole.

Les points de bascule de l'eau sont des seuils critiques au-delà desquels un système hydrologique se réorganise de manière abrupte et irréversible, entraînant des changements majeurs dans la disponibilité et la qualité de l'eau.

Ces points de bascule peuvent être déclenchés par des facteurs climatiques (sécheresse, inondation, fonte des glaciers, etc.) ou anthropiques (surextraction, pollution, détournement, etc.). Des exemples de points de bascule de l'eau sont la disparition de la mer d'Aral, le tarissement du lac Tchad, l'effondrement du courant océanique de l'Atlantique Nord, la salinisation du delta du Nil, etc.

Les impacts des points de bascule de l'eau sont multiples et variés, et ils affectent les écosystèmes, les sociétés, les économies et les cultures qui dépendent de l'eau. Ils peuvent provoquer des crises humanitaires, des conflits, des

migrations, des pertes de biodiversité, des émissions de GES, des effets en cascade sur d'autres systèmes, etc.

Pour éviter ou atténuer les points de bascule de l'eau, il faut adopter une gestion intégrée des ressources en eau de surface, qui vise à concilier les besoins des différents usagers, tout en préservant les fonctions et les services des écosystèmes aquatiques.

Épuisement de l'aquifère

Le pompage excessif des eaux souterraines des aquifères, souvent plus rapide qu'ils ne peuvent se recharger, entraîne un épuisement à long terme des ressources en eau. Ce comportement menace la durabilité des sources d'eau pour les communautés et l'agriculture.

L'épuisement de l'aquifère est un phénomène qui se produit lorsque le prélèvement des eaux souterraines dépasse le taux de recharge naturelle ou artificielle des aquifères, qui sont des formations géologiques capables de stocker et de restituer de l'eau. Cette situation est principalement causée par la surexploitation des eaux souterraines pour l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable, l'industrie, l'énergie, etc. L'épuisement de l'aquifère peut aussi être aggravé par le changement climatique, qui modifie le régime des précipitations et de l'évaporation.

Les conséquences de l'épuisement de l'aquifère sont multiples et graves, et comprennent la baisse du niveau

piézométrique²⁶, la diminution du débit des sources et des cours d'eau, la dégradation de la qualité de l'eau, l'intrusion saline, l'affaissement du sol, la perte de biodiversité, la réduction de la résilience face aux sécheresses, etc.

Pour prévenir ou réduire l'épuisement de l'aquifère, il faut adopter des mesures de gestion durable des eaux souterraines, qui visent à réguler les prélèvements, à optimiser les usages, à protéger les zones de recharge, à favoriser la recharge artificielle, à surveiller l'état des aquifères, à sensibiliser les usagers, etc.

Ces points de bascule structurels pourraient être plus longuement discutés, mais ils ont été mentionnés surtout pour mettre en perspective les multiples défis en jeu, également, pour introduire le prochain chapitre, qui couvrira les risques, l'urgence et les interactions des différents points de bascule.

²⁶ Le niveau piézométrique est l'altitude ou la profondeur de la surface de l'eau souterraine dans une formation aquifère. Ce niveau est une mesure de la pression des liquides, qui est mesurée à l'aide d'un piézomètre. La baisse du niveau piézométrique des aquifères est un phénomène qui résulte d'un déséquilibre entre la recharge et le prélèvement de l'eau souterraine. Elle peut être causée par des facteurs naturels, comme le climat, le relief ou le sol, ou par des facteurs anthropiques, comme l'agriculture, l'urbanisation ou la pollution. La baisse du niveau piézométrique des aquifères peut entraîner des conséquences néfastes sur la quantité et la qualité de l'eau disponible, sur la stabilité des sols, sur la biodiversité et sur le climat.

Chapitre 4

Risques, urgence et interactions

Importance de l'évaluation des risques

Pour s'adapter efficacement au changement climatique, il importe de comprendre avec exactitude à quoi nous avons affaire. Le succès de nos interventions dans le cadre de la lutte climatique en dépend. De plus, dans ce chapitre, nous soulignons davantage l'importance de l'évaluation des risques. En situation d'urgence, l'élément fondamental pour caractériser correctement une action préventive ou correctrice est d'évaluer le risque et l'urgence.

Or, dans le cas de la lutte climatique, il n'est pas suffisant de ne tenir compte que du réchauffement de 1,5°C pour bien évaluer le risque. D'autres éléments doivent également être considérés. Les points de bascule, climatiques ou non mais qui ont alors un impact sur le climat, représentent un élément majeur, mais d'autres aspects sont également à prendre en compte. Notamment, nous pouvons penser aux interactions entre points de bascule. Nous explicitons davantage dans ce chapitre en quoi elles représentent aussi un élément majeur, tout en mettant l'emphase sur l'importance d'en tenir compte dans l'évaluation du risque et des mesures d'adaptation ou d'atténuation du changement

climatique. Nous discutons également des implications de ces risques dans le contexte de la compréhension actuelle.

Voilà qui permettra de prendre conscience que le risque se quantifie objectivement, qu'il n'est alors pas question d'une simple perception subjective, mais surtout que, prendre en compte plusieurs facteurs pertinents dans l'évaluation, aidera à mieux planifier les mesures d'atténuation et d'adaptation requises.

Points de bascule déjà traversés ou imminents

Plusieurs études ont fourni des preuves scientifiques solides concernant la nécessité d'appliquer de manière urgente des mesures visant à atténuer le changement climatique. Cependant, il a été démontré que même l'objectif de l'Accord de Paris, de limiter le réchauffement bien en dessous de 2 °C, et de préférence à 1,5 °C, ne peut pas constituer un indicateur de risque unique. Ce serait insuffisant puisque, pendant qu'on atteint 1,5 °C ou 2 °C ou plus de réchauffement climatique, nous risquons de traverser plusieurs points de bascule, climatiques ou non, et pas uniquement de dépasser le seuil de réchauffement à éviter.

C'est qu'un point de bascule ne requiert souvent qu'un léger changement, tel celui produit par un forçage²⁷, pour

²⁷ Le forçage climatique est un processus physique qui affecte le climat de la Terre par l'intermédiaire d'un certain nombre de facteurs de forçage. Ces facteurs entraînent le changement climatique, et il est important de noter que ces forçages existent aussi en dehors du système climatique naturel.

déclencher une réponse fortement non linéaire dans la dynamique interne d'une partie du système climatique, ce qui modifie qualitativement son état futur [6, 10, 11, 105 et 106].

Toutefois des forçages peuvent avoir des effets variés sur les CTP. Il existe deux principaux types de forçages : le forçage positif et le forçage négatif. Le forçage positif réchauffe la Terre, tandis que le forçage négatif la refroidit. Les forçages peuvent être mesurés en termes de watts par mètre carré de la surface de la Terre. Il s'agit de l'énergie supplémentaire qui entre dans la Terre près du sommet de l'atmosphère. Plus la valeur en W/m^2 du forçage est élevée, plus l'effet du changement sur le climat global sera important. Par exemple, l'augmentation des concentrations de GES dans l'atmosphère est un forçage positif, car elle empêche une partie du rayonnement infrarouge de s'échapper dans l'espace. Les éruptions volcaniques sont un forçage négatif, car elles injectent des aérosols dans la stratosphère, qui réfléchissent une partie du rayonnement solaire et ainsi, provoquent un refroidissement.

La Terre réagit à ces forçages en établissant un nouvel équilibre à une nouvelle température. Ce nouvel état d'équilibre est « forcé », car il ne s'agit pas d'un état naturel, mais d'un état « provoqué par les activités humaines ». La vitesse à laquelle le climat change en réponse à un forçage dépend de divers facteurs, et non seulement de la température.

Le déclenchement de CTP par le forçage climatique, avant même l'atteinte du 1,5 °C, souligne donc l'importance de ne pas s'en tenir à ce seul critère. On doit penser au-delà d'une limite en termes de degrés Celsius. D'ailleurs, au cours des deux dernières années, les rapports du GIEC [7] suggèrent que les CTP pourraient être potentiellement dépassés à l'intérieur de la zone de 1 °C à 2 °C de réchauffement. D'autant que, comme on l'a vu, traverser ces points de bascule peut générer des rétroactions positives, qui augmentent à leur tour la probabilité d'en traverser d'autres.

En guise d'exemple de CTP déclenché précocement, une étude publiée dans *Nature*, par [Lenton et al.](#) [2], a rapporté que les modèles suggéreraient que la calotte glaciaire du Groenland pourrait être vouée à disparaître définitivement si le monde se réchauffe de seulement 1,5 °C.

Dans la même veine, une autre étude, publiée dans *Science* par [McKay et al.](#) [5] en 2022, a montré que la limite inférieure de certaines plages d'incertitude des CTP est traversée dès que le réchauffement climatique atteint 1,1 °C au-dessus des températures préindustrielles. De plus, ces auteurs concluent que certains points de bascule pourraient être franchis même si le scénario « optimiste » du GIEC s'avérait (soit ne pas dépasser 1,5 °C de réchauffement).

Non seulement le scénario à 1,5 °C n'est pas en mesure d'éviter le déclenchement de plusieurs points de bascule, climatiques ou non, mais en plus, il est presque impossible à réaliser, puisque les scénarios optimistes, représentant pourtant l'approche de précaution, impliquent de générer des

émissions négatives (c'est-à-dire en s'appuyant principalement sur le captage du carbone, qui n'est pas réaliste à l'échelle planétaire). Souligner cette quasi-impossibilité ne cherche pas à dire qu'il serait donc inutile d'agir, mais au contraire, il est d'autant plus important d'agir. Cependant, la situation est complexe; donc, les interventions doivent être à la mesure de cette complexité. L'urgence est donc déjà à nos portes. C'est dès maintenant qu'il convient d'agir. Il n'est pas nécessaire d'attendre 1,5 °C de réchauffement, ni 2030, 2040 ou encore moins 2050.

Depuis que nous avons franchi 1,1 °C de réchauffement au-dessus des températures préindustrielles, aux environs de 2017, de nombreux types d'événements inhabituels se sont produits en divers endroits dans le monde entier, comme nous l'avons présenté aux chapitres 2 et 3. Pour en mentionner des nouveaux, plusieurs autres situations se sont produites en Turquie et en Grèce, telles que des tempêtes de neige qui ont causé des perturbations généralisées et ont conduit à l'évacuation de milliers de personnes. Au début de 2022, Madagascar a été frappée par deux tempêtes tropicales qui ont provoqué des inondations et des glissements de terrain²⁸.

²⁸ Madagascar a été frappée par deux tempêtes tropicales importantes dans la même année, en 2022. Il s'agit de la tempête tropicale Ana, qui a fait au moins 34 morts dans la capitale Antananarivo en janvier 2022, et de la tempête tropicale Emnati, qui a touché le sud-est et le sud de l'île en février 2022, après le passage du cyclone Batsirai. Ces événements météorologiques extrêmes ont provoqué des inondations, des glissements de terrain et des pertes de vies humaines, ainsi que des dégâts matériels et agricoles importants. [64]

Pour remettre en perspective l'accélération des phénomènes météorologiques extrêmes, le programme européen [Copernicus](#) affirmait que novembre 2023 était le mois de novembre le plus chaud jamais enregistré sur la planète avec une température de surface moyenne de 14,22 °C, soit 0,85 °C au-dessus de la moyenne de la décennie 1991-2020 pour novembre, et 0,32 °C plus chaude que le précédent mois d'octobre le plus chaud, soit en 2020. Le mois d'octobre 2023 dans son ensemble était à environ 1,75 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle (pour la décennie 1850-1900), et pour la première fois, en novembre 2023, deux jours étaient supérieurs à 2 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle. Selon les estimations de Copernicus, plus d'un tiers des jours en 2023 étaient supérieurs à 1,5 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle [64 et 114].

Or, l'année précédant ces résultats dramatiques, soit en décembre 2022, des recherches menées par [Caillet et al.](#) [6] ont montré que la baie de la mer d'Amundsen de l'Antarctique occidental pourrait déjà avoir dépassé un point de bascule dans la zone où on observe la rencontre de la glace, de l'océan et du substrat rocheux qui se retire de manière irréversible, soit le point de bascule de l'Antarctique, vu au chapitre 2. Selon une recherche publiée dans *Science* [5], aux niveaux actuels du réchauffement mondial, le monde risque donc déjà de déclencher ces CTP, qui présentent un dangereux risque d'emballement.

En outre, les chercheurs ont identifié six points de bascule « susceptibles » d'être franchis de manière imminente, ce sont l'effondrement de l'inlandsis du

Groenland, l'effondrement de l'inlandsis de l'Antarctique de l'Ouest, l'effondrement de la circulation océanique dans la région polaire de l'Atlantique Nord, le récif corallien qui meurt dans les basses latitudes, le dégel soudain du pergélisol dans les régions du Nord et la perte abrupte de glace de mer dans la mer de Barents.

Nous sommes donc en pleine période de franchissement de certains points de bascule et d'atteinte, voire de dépassement, de la limite du scénario optimiste de 1,5 °C. Ceci, alors que, selon les derniers rapports de l'ONU (même si tous les engagements nets zéro et les contributions déterminées au niveau national sont mis en œuvre), le réchauffement climatique le plus probable de se produire pourrait atteindre 2,8 °C au-dessus du niveau préindustriel.

On comprend que le degré de réchauffement n'est donc pas l'unique critère à considérer pour nous convaincre de l'urgence climatique et de celle d'agir, car il ne reflète pas avec exactitude la variabilité des phénomènes climatiques extrêmes ni leurs impacts sur les différents systèmes naturels et humains, ni à lui seul l'imminence et la gravité de l'urgence. D'autant que ces impacts surviennent plus précocement que d'abord prévu et ils s'amplifient entre eux. Par exemple, un réchauffement de 1,5 °C pourrait aussi entraîner la disparition de 70 % à 90 % des récifs coralliens, tandis qu'un réchauffement de 2 °C pourrait les anéantir complètement. De même, un réchauffement de 2 °C pourrait augmenter le risque de franchir certains autres CTP, tels que la fonte du permafrost, la déstabilisation des calottes glaciaires ou la modification des courants océaniques. Focaliser uniquement sur la limite du 1,5 °C fait négliger

tout point de bascule potentiellement dépassé durant cette période, et néanmoins déterminants.

En outre, le degré de réchauffement ne tient pas non plus compte de la distribution spatiale et temporelle du changement climatique, ni de la capacité d'adaptation et de résilience des différents pays et régions. Par exemple, certaines zones géographiques, comme les régions polaires, les petits États insulaires ou les zones arides, sont davantage exposées et vulnérables aux effets du changement climatique, tels que la montée du niveau de la mer, l'érosion côtière, la salinisation des sols, la perte de biodiversité, la sécheresse ou les inondations. De même, certains groupes sociaux, tels que les populations pauvres, les femmes, les enfants, les personnes âgées ou les peuples autochtones, sont plus affectés et moins aptes à faire face aux conséquences du changement climatique, telles que la réduction des ressources naturelles, la dégradation de la santé, la migration forcée, les conflits ou la violation de droits humains.

Autres aspects à considérer concernant l'urgence climatique

Le degré de réchauffement climatique pris en tant qu'unique critère à considérer, en ce qui touche l'urgence climatique, masque donc la complexité et la diversité des impacts de ce phénomène sur les différents systèmes naturels et humains.

En plus du fait que de s'en tenir au 1,5 °C de réchauffement n'est pas suffisant et que les points de

bascule, climatiques ou non, font déjà partie du contexte d'urgence, il faut prendre en compte d'autres indicateurs, tels que les émissions d'autres GES, les scénarios socio-économiques, les trajectoires d'adaptation et d'atténuation, etc., ainsi que les effets domino ou en cascade et les interactions entre points de bascules. Et parmi les autres GES, contribuant donc au réchauffement climatique, se trouve la vapeur d'eau.

Vapeur d'eau

Revenons à la base afin de mieux comprendre l'importance de la vapeur d'eau dans le renforcement du réchauffement climatique²⁹. Pour ce faire, voyons l'équation de Clausius-Clapeyron. La relation Clausius-Clapeyron décrit comment la pression de vapeur saturée d'un corps pur varie avec la température. Or, la vapeur d'eau est le principal GES : elle représente 75 % de tous les GES; le deuxième plus important étant le CO₂, suivi du CH₄ et des particules telles que la suie (carbone noir ou BC pour « black carbon »).

En bref, la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère est régulée par la température de l'air. Des conditions plus chaudes conduisent à une évaporation plus élevée, ce qui augmente la concentration de vapeur d'eau, phénomène illustré par la relation Clausius-Clapeyron :

²⁹ L'équation de Clausius-Clapeyron est une équation fondamentale de la thermodynamique. Elle permet de comprendre que le réchauffement climatique entraîne une augmentation de l'humidité de l'atmosphère, ce qui renforce le réchauffement climatique (soit une rétroaction positive).

$$\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = \frac{\Delta H_{vap}}{RT} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1)$$

où ΔH_{vap} est l'enthalpie (chaleur) de vaporisation, R est la constante de gaz (8,3145 J mol⁻¹ K⁻¹), P1 et P2 sont les pressions de vapeur, à deux températures : T1 et T2. L'équation de Clausius-Clapeyron nous permet d'estimer la pression de vapeur à différentes températures lorsque la pression de vapeur est connue.

Plus spécifiquement, la relation Clausius-Clapeyron permet de comprendre comment le changement climatique affecte le cycle de l'eau et les précipitations. En effet, la pression de vapeur saturante d'un corps pur augmente exponentiellement avec la température. Cela signifie que plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau. Or la vapeur d'eau est un GES, ce qui signifie qu'elle absorbe le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et l'atmosphère, et le réémet dans toutes les directions. Il s'ensuit un effet de serre supplémentaire, qui amplifie le réchauffement climatique déjà présent. De plus, la vapeur d'eau peut former des nuages, qui ont des effets complexes et ambigus sur le climat, selon leur type, leur altitude et leur couverture.

Bien entendu l'évaporation est plus importante à la surface des océans et des continents. Quand l'air est plus chaud, la vapeur d'eau s'en trouve amplifiée. Ces conditions entraînent une augmentation du taux d'humidité atmosphérique, qui favorise la formation de précipitations. C'est ainsi que le changement climatique tend à intensifier le

cycle hydrologique (sans exclure qu'il existe des régions plus humides et des régions plus sèches), et alors, cette situation tend à causer des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses, tels que des sécheresses, des inondations ou des cyclones [85]. L'équation de Clausius-Clapeyron permet donc de comprendre que le réchauffement climatique entraîne une augmentation de vapeur d'eau dans l'air et, par-là, une intensification des pluies, voire des orages et tempêtes ou des précipitations extrêmes, qui peuvent provoquer des inondations, des glissements de terrain ou des érosions. C'est qu'elle explique que plus l'air est humide, plus il peut libérer d'énergie sous forme de pluie ou de neige lorsqu'il se refroidit et se condense. Ce n'est pas tout, à mesure que les océans et l'atmosphère se réchauffent, une boucle de rétroaction autorenforçante accélère le processus d'évaporation pour provoquer un réchauffement supplémentaire, d'où une augmentation exponentielle.

Cependant, on s'entend généralement pour considérer que réguler directement la vapeur d'eau atmosphérique n'est pas possible. Cette limitation explique pourquoi la plupart des stratégies d'atténuation du changement climatique se sont principalement concentrées sur la réduction des émissions de CO₂ comme moyen de réduire la production de vapeur d'eau. En effet, on peut réguler indirectement la production excessive de vapeur d'eau en limitant le réchauffement climatique causé par d'autres GES, comme le méthane (CH₄) ou le CO₂. Toutefois, il n'existe pas de solutions directes pour réduire la vapeur d'eau dans l'atmosphère de façon globale, car celle-ci dépend du cycle de l'eau et de la température.

Cependant, il existe des moyens de réduire la production de vapeur d'eau à l'échelle locale, tels que diminuer l'évaporation des tours d'eau (utilisées pour le refroidissement des centrales thermiques) ou la surutilisation des eaux d'irrigation³⁰ (pour l'agriculture intensive ou le développement urbain en zones désertiques ou quasi-désertiques). Parmi les techniques et pratiques innovantes de gestion de l'eau en agriculture, on peut citer :

- L'alternance de l'arrosage et de l'assèchement des rizières irriguées, qui réduit à la fois la consommation d'eau et les émissions de CH₄ : un autre GES;
- L'utilisation de systèmes d'irrigation goutte à goutte, qui délivrent l'eau directement aux racines des plantes, réduisant ainsi les pertes par ruissellement et évaporation;
- L'adoption d'outils numériques et de capteurs, qui permettent de mesurer l'humidité du sol, la température, la pluviométrie et les besoins en eau des cultures, et d'ajuster l'irrigation en conséquence;
- La récupération et le recyclage des eaux usées traitées, qui peuvent être utilisées pour l'irrigation de

³⁰ Réduire l'utilisation des eaux d'irrigation peut aider à réduire la production de vapeur d'eau dans l'atmosphère, car l'irrigation augmente l'évaporation de l'eau des sols et des plantes. Selon la FAO, l'irrigation représente environ 70 % de la consommation d'eau douce dans le monde, et environ 40 % de la production de vapeur d'eau. Il existe donc un potentiel important d'économie d'eau et de réduction des émissions de vapeur d'eau en améliorant l'efficacité de l'irrigation.

certaines cultures, réduisant ainsi la pression sur les ressources en eau douce.

Interactions et effets domino des points de bascule

Il a été mentionné à plusieurs reprises qu'il existe des interactions entre les points de bascule ou avec le réchauffement climatique, ou que des effets domino peuvent se produire. Or, comme les interactions entre points de bascule pourraient avoir de graves répercussions, elles méritent d'être prises en compte dans l'évaluation des risques liés au changement climatique. Certes, les rétroactions peuvent être positives autant que négatives. Quand elles sont positives, elles peuvent exacerber ou accélérer davantage le rythme des événements catastrophiques. Si un point de bascule s'est déjà déclenché dans le système, il peut représenter ce léger changement qui en déclenche un autre. Et si ce dernier en déclenche un autre à son tour, suivi d'autres déclenchements, il est alors question de la production d'un effet domino en série (figure 19 page suivante).

Par exemple, la fonte de la calotte glaciaire du Groenland peut provoquer la montée du niveau de la mer, qui peut affecter la stabilité de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest, qui peut à son tour accélérer la montée du niveau de la mer. De même, la mort des coraux tropicaux peut réduire la biodiversité et la productivité des écosystèmes marins, qui peut affecter le cycle du carbone océanique, qui peut à son tour influencer le climat global.

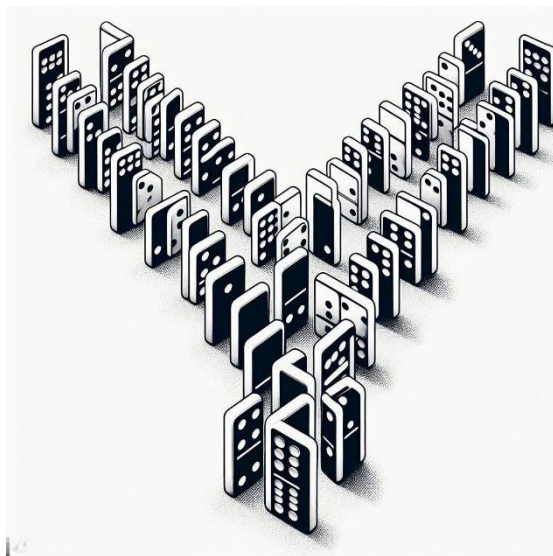


Figure 19 – Effet domino en série. Un domino peut faire tomber par ricochet une série d'autres dominos.

En outre, les interactions entre les points de bascule impliquent que le franchissement de l'un d'entre eux peut augmenter la probabilité ou la gravité du franchissement d'un autre point de bascule, créant ainsi un risque systémique encore plus difficile à enrayer ou à contrôler. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces interactions complexes et imprévisibles pour évaluer plus adéquatement les risques et les opportunités d'interventions liés au changement climatique et aux systèmes socioéconomiques et écologiques.

Les interactions entre les CTP et les points de bascule non climatiques sont également importantes, car elles

peuvent avoir des impacts réciproques sur les systèmes socio-économiques et écologiques. Ainsi, le dégel du pergélisol peut libérer du CH₄, qui est un puissant GES, qui participe à amplifier le réchauffement climatique. Ce dégel peut entraîner des conséquences sur le système alimentaire (un point de bascule non climatique), en réduisant la sécurité et la qualité alimentaires, ce qui peut affecter la santé et le bien-être humains.

Une vue schématique illustrant les éléments de bascule du système climatique de la Terre et leurs interactions est présentée à la figure 20 (page suivante). Les symboles numérotés montrent les éléments de bascule potentiels dans le système terrestre. Les lignes jaunes pointillées indiquent les liens possibles entre les CTP identifiés dans une étude de [Liu et al](#) [104], et les lignes rouges pleines représentent les interactions que les auteurs ont relevées. Les flèches illustrent la direction de l'influence.

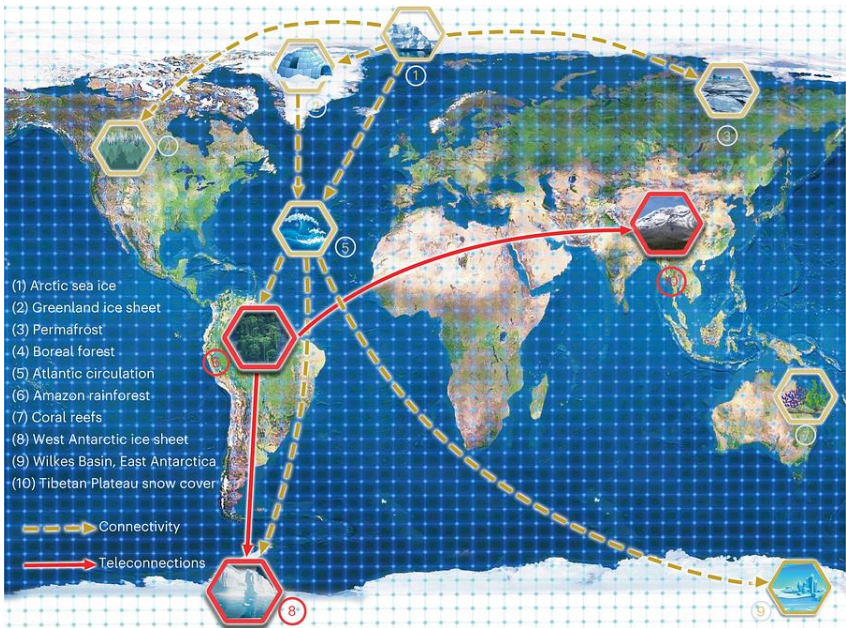


Figure 20 – Vue schématique des points de bascule du système climatique terrestre, de leur connectivité et de leurs interactions. Image de : Liu et al. *Teleconnections among tipping elements in the Earth system* [104] <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01558-4>.

Comme exemple d'interactions, prenons le cas des forêts. Elles sont confrontées à de graves défis, notamment des sécheresses survenant à des températures de plus en plus chaudes et souvent associées à des événements majeurs et aussi, de mort forestière³¹ répandus sur de plus en plus

³¹ La mort forestière ou mortalité des arbres désigne simplement la mort d'arbres forestiers et fournit une mesure de la santé de la forêt. La mort prématurée d'arbres sains peut survenir lors des sécheresses et d'autres

larges étendues. Les forêts revêtent une importance vitale pour les services mondiaux des écosystèmes, et pourtant, leur sort dans un monde en réchauffement reste très incertain. La fréquence des conditions climatiques extrêmes et leurs conséquences observées en termes de mortalité d'arbres augmentent fortement de façon non linéaire en fonction des niveaux de réchauffement attendus.

Sur le schéma de la figure 21 (page suivante), publiée en octobre 2023 par l'Institut national de l'information géographique et forestière de France (IGN France), on note une hausse de plus de 77 % de la mortalité des arbres sur la période 2013-2021 par rapport à celle de 2005-2013. Alors que l'on attend énormément des forêts pour absorber le carbone issu des activités humaines, l'IGN France observe que la capacité à absorber le carbone est en perte de vitesse. C'est que la capacité à absorber le carbone régresse substantiellement. En France, cette capacité était de 40 millions de tonnes de CO₂ par an en moyenne sur la période 2013-2021 (pour un volume de bois de 2,8 milliards de m³), alors que l'absorption de CO₂ par le puits de carbone que représentent les arbres était de 63 millions de tonnes en moyenne par année entre 2005 et 2013 (pour un volume de bois de 2,6 milliards de m³, inférieur à celui de la décennie suivante). Soit une réduction de la capacité à absorber le carbone de plus du tiers en une décennie.

phénomènes météorologiques extrêmes, ou lorsque le climat déclenche des infestations d'insectes ravageurs dans des forêts affaiblies.

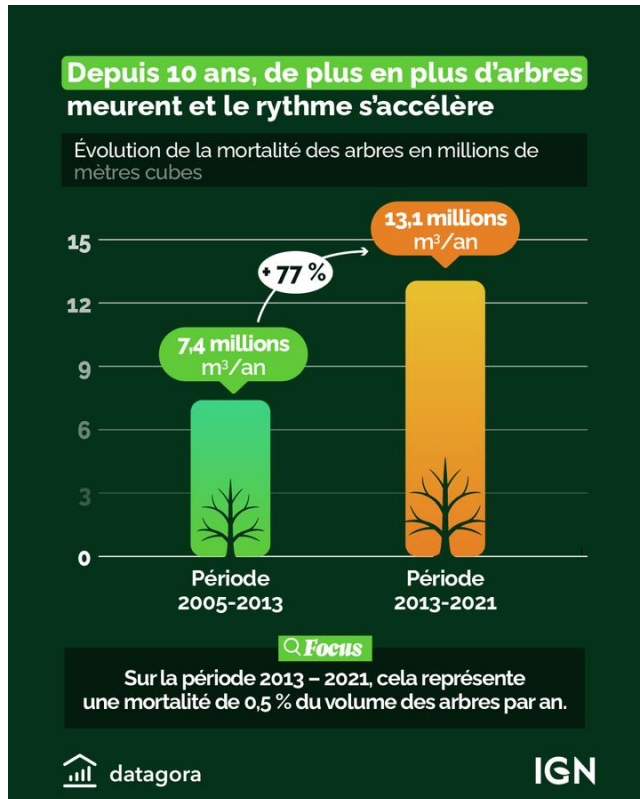


Figure 21 – Augmentation de la mortalité des arbres. Source : IGN France www.ign.fr [111].

On peut en déduire l'importance de mettre en place une nouvelle surveillance quantitative et qualitative, notamment fondée sur la mortalité des arbres, mais aussi que s'avérera encore plus critique une action mondiale pour régénérer les forêts, car ces dernières représentent un des plus importants puits de carbone sur Terre.

Limites terrestres : un autre indicateur d'urgence imminente

Un autre facteur est important à considérer en lien avec l'urgence climatique actuelle, à savoir, les limites terrestres.

Une étude publiée en 2015 dans *Science* [99] (et bonifiée dans un article publié en 2022 dans *Nature* [100] par plus d'une vingtaine de scientifiques) confirme que, en raison de perturbations humaines, la planète a déjà traversé plusieurs limites planétaires, soit des processus critiques du système de la Terre.

Les limites planétaires sont des seuils à partir desquels un changement, même minuscule, peut affecter négativement le fonctionnement et la stabilité du système Terre, qui englobe les équilibres naturels de la planète. Il s'agit de réserves planétaires (qu'on appelle les « Planetary Boundaries » en anglais). « Limites planétaires » est un concept scientifique qui concerne un ensemble de processus qui régulent la stabilité et la résilience du système terrestre, et qui définissent les quantités (pour chaque processus) à ne pas dépasser pour éviter des changements environnementaux abrupts ou irréversibles. Les limites planétaires visent, en ne les dépassant pas, à définir un espace de vie sûr pour l'humanité, tout en tenant compte des incertitudes, du principe de précaution et de l'inertie du système.

Les auteurs de cette étude [99, 100] conduite par le chercheur suédois Johan Rockström et ses collègues, du Stockholm Resilience Center (SRC) ont établi neuf grands

processus impliqués dans le fonctionnement du « système Terre » :

1. Le climat;
2. La biodiversité;
3. Les forêts;
4. L'eau douce;
5. L'acidification des océans;
6. Les cycles de l'azote et du phosphate;
7. La pollution chimique;
8. Les aérosols émis dans l'atmosphère;
9. La couche d'ozone.

Or, pour chacun de ces processus, les scientifiques ont défini une limite. Franchir n'importe laquelle des limites augmente le risque de déstabiliser l'environnement planétaire de manière irréversible, avec des impacts majeurs pour les êtres vivants (voir figure 22). Aujourd'hui, six limites planétaires seraient dépassées, selon leur analyse. Une limite terrestre correspond donc à une zone d'augmentation forte des risques.

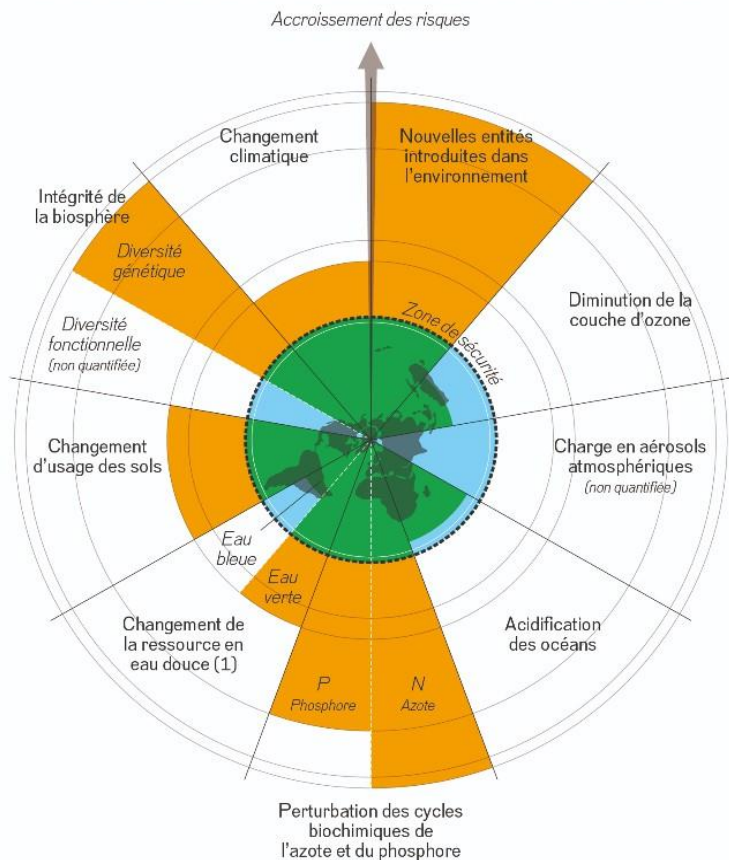
Les auteurs de ces études du SRC [80, 99, et 100] affirment aussi que le fait de ne pas tenir compte des interactions entre les limites planétaires peut réduire l'espace sécuritaire pour l'humanité (c'est-à-dire le temps encore disponible) avant que chaque limite ne soit épuisée. En

utilisant une élicitation³² des connaissances par un groupe d'experts (afin de formaliser des connaissances et d'en permettre un partage clair), les chercheurs du SRC ont exploré les interactions entre sept variables représentant des processus du système terrestre pertinents pour la production alimentaire, et ils ont identifié de nombreuses interactions peu explorées dans la littérature sur le système terrestre.

Ces interactions entre les éléments du système terrestre ont aussi été confirmées par une équipe multidisciplinaire de près de 40 scientifiques qui ont publié leurs conclusions dans *Nature* en 2022 [103] (voir figure 20 précédemment présentée).

³² L'élicitation est une méthode qui consiste à recueillir et à synthétiser des jugements d'experts sur un sujet donné, en utilisant des techniques rigoureuses et transparentes. L'élicitation permet de combler les lacunes de connaissances, de réduire les incertitudes, de quantifier les probabilités et de prendre en compte les divergences d'opinions.

LES LIMITES PLANÉTAIRES EN 2022



(1) Utilisation de l'eau bleue (les lacs, les rivières et les nappes souterraines) / l'eau verte (humidité des sols)

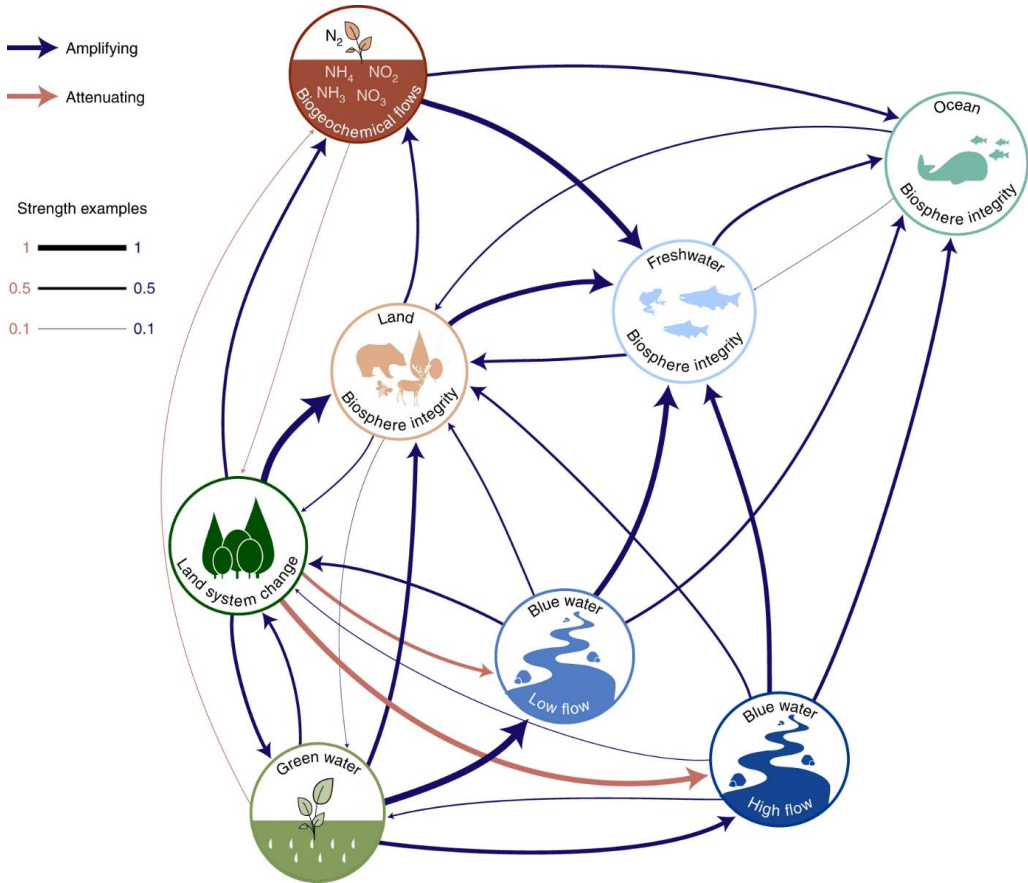
<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

Reporterre
le quotidien de l'écologie

Figure 22 – Limites planétaires en 2022. Les segments en orange sont ceux pour lesquels la limite est atteinte ou franchie. La limite est une zone d'augmentation forte des risques. Source : Reporterre, consulté le 15 décembre 2023 © Stéphane Jungers/Reporterre
<https://reporterre.net/Qu-est-ce-que-les-limites-planetaires>.

L'élicitation a permis de déterminer les connaissances scientifiques disponibles, mais aussi, d'obtenir des jugements d'experts, des valeurs de limites planétaires, et cela, en se basant sur des analyses, qui peuvent varier selon les disciplines, les méthodes, les hypothèses et les valeurs. La méthode a également permis de définir les zones d'incertitude et de précaution autour des limites planétaires, qui reflètent le degré de confiance et de risque associé à chaque limite. Le groupe de chercheurs a constaté que le dépassement d'une limite affecte fortement d'autres processus terrestres, tandis que les composantes terrestres, d'eau douce et océanique, ainsi que l'intégrité de la biosphère sont les plus touchées par d'autres processus du système terrestre, notamment l'eau bleue et les flux biogéochimiques. Les auteurs ont également cartographié un réseau complexe de mécanismes médiateurs de ces interactions et créé un schéma de priorisation de la recherche basé sur les forces d'interaction et les lacunes de connaissances existantes.

Une étude récente du SRC [83] met elle aussi en lumière des interactions entre les limites du système terrestre (illustrées sur la figure 23 à la page suivante). Cette schématisation, en pointes de tarte (où chaque pointe est une limite terrestre à risque), rend plus explicite la modélisation du système terrestre et des limites biophysiques. En outre, l'étude comporte une section portant sur une production alimentaire durable avec une perspective plus nette pour le futur.



-
Figure 23 – Diagramme de l'assemblage d'interactions identifiées, suivant une disposition de type « Force-Directed ». Source : Chrysafi et al. *Nat Sustain* 5, 830-842 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00940-6> [106].

Bref, le degré de réchauffement climatique n'est pas l'unique critère à considérer lorsqu'il s'agit d'estimer l'urgence climatique actuelle et les urgences à venir. En effet, il convient de tenir également compte des points de bascule, de leurs interactions entre eux et avec différents systèmes biophysiques, ainsi que des effets domino et des limites terrestres, sans oublier la vapeur d'eau et divers autres GES.

En outre, la traversée de plusieurs points de bascule en même temps pourrait engager le monde dans des changements irréversibles à très long terme, et beaucoup plus rapidement qu'on ne le pense, c'est-à-dire que nous ne pourrions plus en arrêter les conséquences, et nous pourrions même être incapables de les affronter.

Négliger ces aspects dans la représentation de l'état actuel des choses fait qu'on ne réalise pas l'ampleur de l'urgence climatique et de celle de devoir agir sérieusement, dès maintenant. Alors que tenir compte de ces aspects et de la complexité systémique qui en résulte donne également un portrait plus complet de la situation, ce qui permet une meilleure évaluation des divers risques encourus. Complexifier peut donner l'impression de compliquer une intervention; mais au contraire, cette précaution apporte des ancrages beaucoup plus précis, susceptibles de mieux orienter les interventions d'adaptation ou d'atténuation climatique et ainsi, d'en accroître l'efficacité. Voyons maintenant comment s'évaluent les risques.

Processus de l'évaluation des risques

Le processus qui permet de cerner les dangers et les facteurs de risque pouvant causer un préjudice est l'évaluation de risque, se voulant rigoureuse, dynamique et adaptative. Celle-ci permet d'analyser et d'examiner le niveau de risque associé à un danger et de déterminer des moyens appropriés pour l'éliminer ou pour maîtriser le risque lorsque le danger ne peut pas être éliminé.

L'évaluation des risques est souvent utilisée pour caractériser l'urgence d'une situation, laquelle est définie comme étant le produit du risque et de son imminence. Le risque inclut notamment le degré de gravité d'une situation.

Le risque correspond à la probabilité qu'un événement indésirable se produise, multipliée par la gravité de l'événement concerné. L'imminence est définie comme la probabilité que l'événement se produise dans un avenir proche. L'urgence est le produit de ces deux facteurs, à savoir la gravité de la situation et la probabilité qu'elle se produise dans un avenir proche. Son calcul permet de connaître le degré d'urgence.

Lenton et al. ont précisé le concept d'urgence pour l'évaluation des risques : l'urgence (E) en tant que produit du risque (R) et de l'imminence (U).

$$E = R \times U = p \times D \times \tau / T \quad (2)$$

Le risque (R) est défini par les assureurs comme étant la probabilité (p) multipliée par les dommages (D). L'imminence (U) est définie dans les situations d'urgence comme étant le temps de réaction à une alerte (τ) divisé par le temps d'intervention restant pour éviter un mauvais résultat (T). Une situation constitue une urgence si le risque et l'imminence sont élevés. Nous avons perdu le contrôle si le temps de réaction est plus long que le temps d'intervention restant ($\tau / T > 1$).

De façon générale, l'urgence d'une situation est un facteur important à prendre en compte lors de la planification de la gestion des risques. Bien mener cette étape peut en effet réduire la probabilité qu'une situation d'urgence potentielle survienne ou peut diminuer l'ampleur de ses impacts. De plus, elle aide à identifier les mesures possibles afin d'atténuer les risques pour protéger les personnes et les biens. Plus une situation est urgente, plus elle peut avoir de conséquences négatives sur la sécurité, la santé, l'environnement, la propriété et la continuité des activités d'une organisation ou d'une collectivité. D'où l'importance de la caractériser, et plus précisément, en respect des bonnes pratiques, de considérer les risques d'abord et leur imminence ensuite, ce qui permet notamment une hiérarchisation des risques en fonction de leur urgence.

De manière plus concrète, il s'agit de procéder à une gestion des risques. Celle-ci a pour but de réduire la vulnérabilité et d'augmenter la résilience face aux situations d'urgence. Elle permet également de limiter les dommages et les pertes, ainsi que de faciliter la récupération et le rétablissement d'une situation donnée; enfin, de tirer les

leçons des expériences passées. Brièvement, planifier la gestion des risques consiste à appliquer les étapes suivantes : 1) l'identification des risques, 2) l'analyse et l'évaluation, 3) le traitement et 4) la surveillance des risques. Une fois ces étapes complétées, il reste à préparer et à mettre en œuvre les mesures d'urgence appropriées.

À la première étape de la gestion des risques, soit l'identification (1), le degré d'urgence s'exprime entre autres en termes de fréquence et de sévérité des situations possibles. Or, nous suggérons qu'il serait pertinent d'appliquer l'identification des risques à des CTP. Il s'agirait d'une étape importante pour la prise de décision et la mise en œuvre de politiques publiques visant à prévenir ou à réduire les CTP, ou à s'y adapter, car les risques qui n'y seront pas identifiés pourraient ne pas se retrouver dans l'analyse (soit à la prochaine étape), et ainsi être négligés lors de la mise en œuvre subséquente des mesures d'atténuation.

À l'étape suivante, celle de l'analyse et de l'évaluation des risques (2), on détermine des critères pour prioriser les risques et le niveau de tolérance au risque. Cette phase consiste également à analyser et à examiner le niveau de risque associé au danger et à déterminer des moyens appropriés pour éliminer le danger ou pour maîtriser le risque lorsque le danger ne peut pas être éliminé. Il existe différentes méthodes et outils pour évaluer les risques des CTP, selon le niveau de détail, la complexité et l'incertitude des données disponibles. Parmi les méthodes et outils possibles, on peut citer :

- L'analyse des scénarios, qui consiste à construire des conjonctures cohérentes et probables sur l'évolution du climat et ses effets, en tenant compte des incertitudes et des interactions entre les différents facteurs;
- L'analyse probabiliste, qui consiste à quantifier la probabilité et la distribution des CTP, en utilisant des modèles mathématiques, statistiques ou informatiques, et en intégrant les sources d'incertitude;
- L'analyse multicritère, qui consiste à comparer les CTP selon différents critères, tels que la gravité, l'urgence, l'irréversibilité, la réversibilité, la prévisibilité, etc.;
- L'analyse de sensibilité, qui consiste à tester la robustesse des résultats de l'évaluation des risques face aux variations des paramètres d'entrée, tels que les émissions de GES, les paramètres climatiques, les seuils de basculement, etc.

L'évaluation des risques est une étape cruciale, qui permet de hiérarchiser les CTP selon leur importance, de définir des objectifs et des indicateurs de suivi et de concevoir des stratégies et des mesures adaptées.

À l'étape du traitement des risques (3), on doit choisir les mesures les plus adaptées pour prévenir, atténuer, transférer ou accepter les risques, en fonction de leur urgence. Cette étape consiste à identifier les mesures potentielles qui pourraient permettre de réduire les risques, ce qui implique aussi d'évaluer et de sélectionner les mesures qui devront

être adoptées en fonction de leur pertinence et de leur efficacité, et enfin, à planifier leur mise en œuvre. Concernant le changement climatique, des mesures de traitement des risques peuvent être classées en deux catégories :

- 1) **L'atténuation (ou mitigation) :** Il s'agit de prendre des actions pour éviter ou réduire la probabilité d'occurrence d'un événement indésirable ou de ses conséquences. Par exemple, voir à transformer certains modes de production et de consommation d'énergie, de transport, d'agriculture, d'industrie, etc., en des solutions plus sobres, plus efficaces et plus renouvelables.

- 2) **L'adaptation :** Il s'agit de prendre des actions pour réduire la gravité ou l'impact d'un événement indésirable ou de ses conséquences. Par exemple, renforcer les infrastructures, diversifier les sources d'approvisionnement, s'adapter aux impacts du changement climatique déjà visibles et qui vont s'accroître dans le futur. Mettre en œuvre l'adaptation pourrait nécessiter de renforcer la résilience des populations, des territoires, des infrastructures, des écosystèmes, etc., face aux aléas climatiques, tels que les sécheresses, les inondations, les vagues de chaleur, les incendies, etc. Le traitement des risques des CTP doit être mené de manière préventive et précautionneuse, en tenant compte des valeurs et des préférences des différents acteurs et parties prenantes, et en mobilisant les connaissances scientifiques et les savoirs locaux.

De manière générale, la surveillance des risques (4) doit assurer un suivi constant et une révision périodique, à la fois des risques et des mesures d'urgence, en tenant compte de leur évolution et de leur efficacité. Cette étape consiste à assurer un suivi constant et une révision périodique des risques et des mesures. Par exemple, la surveillance des risques appliquée aux points de bascule consisterait à assurer un suivi constant de ceux qui sont pertinents aux objectifs visés et une révision périodique des risques concernés ainsi que des mesures à envisager. D'une façon générale, l'étape de la surveillance des risques (4) permet de :

- Détecter les changements dans le contexte, les sources, les causes, les conséquences ou les probabilités des risques;
- Mesurer la performance des mesures de traitement des risques et leur impact sur le niveau de risque résiduel;
- Identifier les nouveaux risques ou les opportunités (ou solutions) émergentes;
- Communiquer les informations pertinentes sur les risques et les mesures de traitement aux parties prenantes concernées;
- Ajuster ou améliorer les mesures de traitement des risques si nécessaire.

Relativement aux CTP, la quatrième étape du processus des risques, soit l'évaluation (4), permettrait plus spécifiquement de détecter les changements qui surviennent dans le système climatique, de mesurer la performance des

mesures de traitement, d'identifier les nouveaux risques ou les opportunités émergentes, de communiquer des informations pertinentes aux parties prenantes, ainsi que d'ajuster ou d'améliorer les mesures, au besoin. La surveillance des risques des CTP devrait reposer sur des outils et des méthodes, tels que les indicateurs de risque, les tableaux de bord, les audits, les revues, les rapports, les enquêtes, les sondages, etc.

Une fois toutes ces étapes effectuées, le moment venu de préparer et de mettre en œuvre les mesures d'urgences, ces dernières devraient être proportionnelles à l'urgence de la situation et mobiliser les ressources et les acteurs nécessaires.

Urgence et points de bascule

Les points de bascule sont certes plus complexes que le réchauffement climatique; et on a déjà mentionné qu'il est également possible d'en évaluer l'urgence. En outre, caractériser l'imminence des points de bascule peut être très utile pour déterminer le bon moment d'agir. Ceci parce que l'imminence relative aux points de bascule s'évalue en termes de potentiel de basculement, et que ce calcul établit à quel point on s'approche du moment de leur déclenchement.

Pour ce qui concerne les CTP en particulier, c'est plus spécifiquement le potentiel de basculement climatique qu'il est utile d'établir. Celui-ci exprime l'impact absolu d'une émission marginale GES en fonction de sa part de l'impact total qui peut encore avoir lieu avant qu'un niveau cible

prédéfini ne soit atteint. En d'autres termes, un basculement climatique des CTP peut survenir lorsqu'une émission marginale de GES est néanmoins suffisante pour déclencher un renversement de situation, c'est-à-dire une perte de contrôle. Or, il est possible d'évaluer le potentiel d'occurrence d'un basculement à un moment donné, en divisant l'impact actuel sur le seuil cible attendu pour qu'il y ait basculement.

Le seuil de déclenchement³³ des CTP peut varier selon les systèmes considérés (océaniques, glaciers, Antarctique, récifs de corail, etc.), et il est donc souvent difficile de le prévoir avec précision. Cependant, pour chaque CTP, on peut identifier une plage de probabilité du déclenchement en recourant au calcul de l'urgence (E), qui est, comme nous l'avons vu, le produit du risque et de l'imminence.

³³ Le seuil de déclenchement des points de bascule peut être assimilé au niveau de réchauffement climatique au-delà duquel un système se réorganise de manière abrupte et irréversible. Il s'agit d'un seuil critique qui peut provoquer des changements majeurs dans le fonctionnement du système climatique et en termes d'impacts sur les écosystèmes et les sociétés humaines.

Seuils de réchauffement climatique des points de bascule du climat			
		Data Source: McKay et al. (2022)	
Points de bascule du climat (CTP)	Seuil (°C)		
	Min	Estimation	Max
1 Calotte glaciaire du Groenland (effondrement)	0,8	1,5	3
2 Calotte glaciaire de l'Antarctique occidental (effondrement)	1	1,5	3
3 Récifs coralliens à basse latitude (extinction)	1	1,5	2
4 Pergélisol boréal (dégel brusque)	1	1,5	2,3
5 Convection de la mer du Labrador Irminger SPG (effondrement)	1,1	1,8	3,8
6 Circulation Atlantique A.M.O.C. (effondrement)	1,4	4	8
7 Glace de mer de Barents (perte brusque)	1,5	1,6	1,7
8 Glaciers de montagne (perte)	1,5	2	3
9 Forêt boréale (dépérissement au sud)	1,5	4	5
10 Forêt boréale (expansion au nord)	1,5	4	7,2
11 Bassins sous-glaciaires de l'Antarctique oriental (effondrement)	2	3	6
12 Forêt amazonienne (dépérissement)	2	3,5	6
13 Mousson de l'Afrique de l'Ouest et Sahel (verdissement)	2	2,8	3,5
14 Pergélisol boréal (effondrement)	3	4	6
15 Glace de mer d'hiver de l'Arctique (effondrement)	4,5	6,3	8,7
16 Islandis de l'Antarctique oriental (effondrement)	5	7,5	10

Tableau 1 – Seuils de réchauffement des points de bascule climatiques. Analyse : Stéphane Bilodeau; Source de données : McKay et coll. (2022) [5].

Afin de se représenter l'imminence, le tableau 1 résume les différents seuils des CTP [5] en appliquant la méthode de calcul précisée précédemment. D'après nos analyses (voir tableau 1), nous observons que cinq CTP sont déjà entrés dans l'intervalle de leurs seuils de franchissement respectifs, car leur plage démarre à des valeurs se situant entre 0,8 °C et 1,1 °C de réchauffement (se référer à la valeur minimale

selon le CTP, pour les numéros 1 à 5 dans le tableau). De plus, cinq autres points de bascule se situeront probablement dans la plage de franchissement avant 2030, étant donné que le 1,5 °C pourrait être atteint d'ici là (selon le dernier rapport du [GIEC](#) [7]) C'est donc que dix points de bascule sont soit déjà franchis ou sur le point de l'être.

On se rappelle que tous les CTP listés dans ce tableau entraînent des conséquences graves pour les écosystèmes mondiaux. Leur niveau de gravité va donc de élevé à très élevé. On conçoit aussi que certains de ces points de bascule sont soit très imminents soit imminents.

Quelques rappels et analogies peuvent aider à mieux se représenter encore l'urgence d'agir. Rappelons d'abord que, de façon générale, une situation est une urgence quand le risque et l'imminence sont élevés, c'est-à-dire quand il y a une forte probabilité qu'un événement indésirable se produise dans un délai très court, et qu'il entraîne des conséquences graves pour la sécurité, la santé, l'environnement ou la continuité des activités. Par exemple, une crise cardiaque, un incendie, une inondation ou une attaque terroriste sont des situations d'urgence.

Le temps de réaction correspond au délai entre le moment où la situation d'urgence est détectée et le moment où l'intervention est initiée. Le temps total d'intervention concerne le délai entre le moment où l'intervention est initiée et le moment où elle est terminée. Le temps d'intervention restant est le délai maximal avant que la situation d'urgence ne devienne incontrôlable ou

irréversible. Par exemple, le temps d'intervention restant pour une crise cardiaque est de quelques minutes, car au-delà, le cœur peut cesser de battre définitivement.

Si le temps de réaction est plus long que le temps d'intervention restant, cela signifie que l'intervention arrive trop tard pour prévenir ou limiter les dommages causés par la situation d'urgence. Nous en avons probablement perdu le contrôle, car nous n'avons plus la capacité d'influencer le cours des événements ou de rétablir la situation normale. Par exemple, si le temps de réaction pour un incendie est de 20 minutes, mais que le temps d'intervention restant est de 15 minutes, cela signifie que l'incendie aura probablement détruit le bâtiment avant que les pompiers n'arrivent.

Le parallèle à faire avec la lutte au changement climatique est qu'il faut réagir au plus tôt (c'est-à-dire, à l'intérieur du temps d'intervention) pour en limiter les conséquences. Remarquons au passage qu'un temps de réaction relativement éloigné (quelques années devant suffire) peut facilement transmettre une fausse impression de ne pas être urgent. Alors que le point déterminant pour que ce soit le cas, c'est si le temps qu'il reste est suffisant, ou pas, étant donné la durée d'une intervention. Nos perceptions de l'urgence devraient s'établir selon cet aspect.

Pour éviter de perdre le contrôle d'une situation d'urgence, il faut donc réduire le temps de réaction à son minimum, en mettant en place des systèmes de détection, d'alerte, de communication et de coordination efficaces. Il faut également augmenter le temps d'intervention restant, en renforçant la prévention, la protection, la préparation et la résilience des systèmes exposés aux risques.

Ainsi, concernant l'urgence climatique, le fait qu'une plage de franchissement des CTP approche diminue déjà notre temps d'intervention disponible. En appliquant l'urgence aux points de bascule, on peut également évaluer à quel point on approche de la perte de contrôle ou si l'on s'y trouve déjà.

Nous avons développé une charte de l'urgence des points de bascule des CTP les plus imminents (voir figure 24 à la page 124). Cette charte illustre les conclusions relativement aux seuils probables des CTP les plus imminents, en nombre d'années, avant leur déclenchement. Une telle charte présente les seuils de réchauffement des CTP et leur risque d'occurrence dans une plage allant de minimum à maximum et une estimation du moment le plus probable de déclenchement du point de bascule. Elle peut être utile pour sensibiliser les gens aux différents risques du changement climatique les plus probables à court ou moyen terme et pour les aider à identifier les aspects à prioriser dans la prise de mesures pour réduire leur impact sur l'environnement. Cette charte pourrait également être utilisée pour informer les décideurs politiques et les gouvernements concernant les risques associés au changement climatique et les soutenir dans l'élaboration de politiques et de stratégies pour lutter contre le changement climatique. Cependant, il est important de noter que les prévisions sous-jacentes à la charte sont basées sur des données climatiques qui évoluent continuellement.

Pour utiliser une telle charte, il importe donc de continuellement la mettre à jour avec des données plus

récentes. Pour que la charte soit un bon indicateur des risques et scénarios probables, il est important de prendre en compte les incertitudes associées aux prévisions et, pour prendre des décisions importantes, de ne pas uniquement se fier à la charte mais aussi à d'autres sources d'information pertinentes. C'est que certaines des estimations pourraient être soit en deçà soit au-dessus de la réalité. Quoiqu'il en soit, les secteurs orange foncé qu'on y voit se trouvent tous dans la zone critique « perte de contrôle », tandis que l'orange moyen correspond aux urgences qui se rapprochent de la zone critique.

En évaluant l'urgence, et plus spécifiquement en calculant l'imminence et le temps de réaction, nous concevons plus aisément la nécessité d'intervenir rapidement. Cette prise de conscience est encore plus élevée quand un phénomène extrême se produit plus près de notre réalité locale.

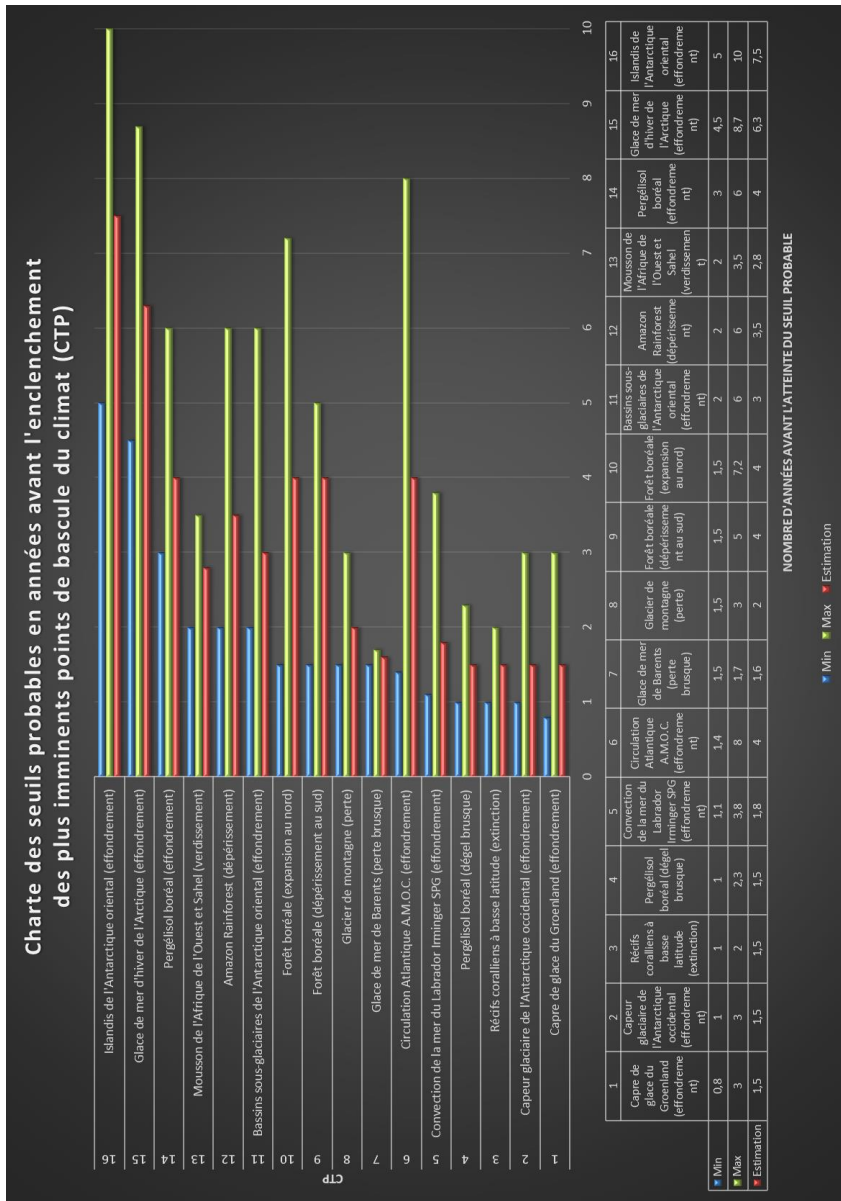


Figure 24 – Charte de déclenchement des plus imminents points de bascule du climat (CTP), développée par Stéphane Bilodeau.

Évaluation des risques et priorisation des actions

Comme nous l'avons vu, l'évaluation des risques est un processus qui permet de cerner les dangers et les facteurs de risque susceptibles de causer un préjudice. Elle permet aussi d'analyser et d'examiner le risque associé au danger et de déterminer des moyens appropriés pour éliminer le danger ou pour maîtriser le risque lorsque le danger ne peut pas être éliminé. Rappelons aussi que l'évaluation des risques est utilisée pour déterminer l'urgence d'une situation (définie comme étant le produit du risque et de l'imminence), ainsi que les mesures à prendre pour réduire les risques et pour protéger les personnes et les biens. Cela s'applique également aux CTP, puisque ceux-ci sont des seuils critiques dans les systèmes écologiques, où un petit changement peut entraîner des conséquences drastiques et irréversibles. Il faut agir promptement pour intercepter ce risque de bascule.

Rappelons les cinq CTP les plus près de se produire : la fonte de la calotte glaciaire du Groenland, la fonte de la calotte glaciaire de l'Antarctique de l'Ouest, la mort des coraux tropicaux, le dégel du pergélisol septentrional et la perte de la banquise de la mer de Barents. Le franchissement de leurs seuils pourra rapidement entraîner des perturbations importantes dans les systèmes écologiques et socioéconomiques des lieux où ils se produisent, créant des défis importants pour l'adaptation au changement climatique [80, 99, 100]. En outre, une récente mise à jour du cadre des limites planétaires, publiée en septembre 2023 par Richardson et al. dans *Science Advances* [80], et aussi dans

Nature [101], confirmait que la majorité des neuf limites planétaires sont déjà transgressées ou sur le point de l'être, ce qui suggère que la Terre est maintenant bien en dehors de l'espace de fonctionnement sûr pour l'humanité, soit ce qui a été nos conditions de vie depuis les débuts de l'Holocène.³⁴

Les limites planétaires ne sont pas uniquement liées à l'Holocène; elles le sont également avec les points de bascule, et étroitement, car elles se situent en amont des points de bascule. En effet, le franchissement de ces derniers peut faire transgresser des limites planétaires et ainsi, faire sortir le système Terre du régime de l'Holocène.

La figure 25 à la page 128 (septembre 2023³⁵ [80]) illustre le statut actuel (niveau de dépassement) des limites planétaires. Cette charte plus récente que celle de la figure 22 illustre la progression de la transgression des

³⁴ L'Holocène est la période géologique actuelle, qui a débuté il y a environ 11 000 ans, après la dernière glaciation. L'Holocène se caractérise par un climat relativement stable et doux, qui a permis le développement de la civilisation humaine et de la biodiversité. L'Holocène est considéré comme le régime du système Terre dans lequel l'humanité peut vivre dans un écosystème sûr.

³⁵ Il s'agit d'une mise à jour du cadre conceptuel proposé en 2008 [13] et révisé en 2015 [74], qui identifiait neuf seuils critiques pour le fonctionnement et la stabilité du système terrestre. Le rapport de 2023 [83] souligne l'urgence d'agir pour réduire la pression humaine sur la planète et éviter des changements irréversibles ou catastrophiques. Il appelle à une transformation profonde des systèmes socio-économiques, notamment en matière d'énergie, d'alimentation, de mobilité et de consommation. Il propose également des pistes pour renforcer la résilience des écosystèmes et des sociétés face aux perturbations environnementales. [83]

limites. Ce dernier rapport quantifie pour la première fois ces limites planétaires, en utilisant de nouvelles variables de contrôle et des données actualisées. Il montre que six des neuf limites planétaires sont désormais dépassées, ce qui signifie que la planète se trouve déjà bien au-delà de l'espace de fonctionnement sûr pour l'humanité.

Notons que l'acidification des océans approche de sa frontière planétaire. La zone verte est l'espace de fonctionnement sûr (sous la limite). Le jaune à rouge représente la zone de risque croissant.

De plus, le violet indique la zone à haut risque où les conditions du système des terres interglaciaires³⁶ sont transgressées, avec une grande incidence.

³⁶ Les terres interglaciaires sont des terres qui ont été exposées lors des périodes interglaciaires. Ces terres sont transgressées lorsque le niveau de la mer monte, en raison de la fonte des calottes glaciaires ou de la dilatation thermique de l'eau dues au réchauffement global. Ce phénomène entraîne l'érosion, la submersion ou l'isolement des terres interglaciaires, qui perdent ainsi de leur superficie, leur biodiversité et leur valeur culturelle.

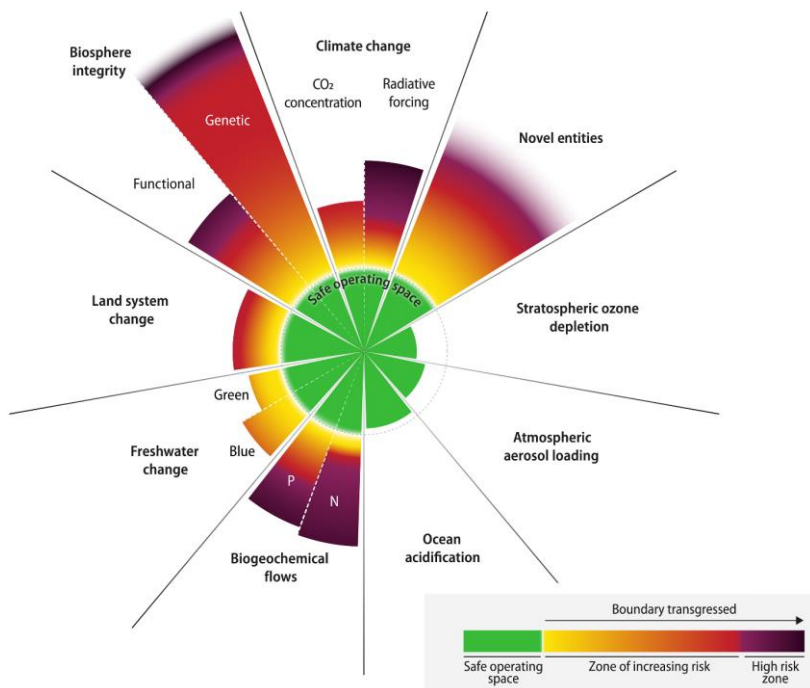


Figure 25 – Illustration des limites planétaires et de leur niveau de dépassement. Source : Richardson et al. *Earth beyond six of nine planetary boundaries. Science Advances* 9, eadh2458 (2023) [80].

La figure 25 (une version augmentée de la figure 22) utilise des valeurs de variables de contrôle normalisées, de sorte que le centre représente les conditions moyennes de l'Holocène et la frontière planétaire est représentée par l'extrémité inférieure de la zone de risque croissant, c'est-à-dire le cercle en pointillés, qui se trouve au même rayon pour toutes les limites, à l'exception des sections représentant de l'eau verte et bleue. Les risques qui pèsent sur l'eau dite « bleue », autrement dit les lacs, les rivières et

les nappes souterraines, y est pris en compte, mais le changement du niveau d'humidité des sols, appelé « eau verte », s'est ajoutée au concept de limite planétaire depuis 2022.

Les longueurs doivent être considérées suivant l'échelle logarithmique. Les bords supérieurs des pointes du graphique correspondant aux limites planétaires « nouvelles entités » et « diversité génétique » (qui est un élément de la limite d'intégrité de la biosphère) sont flous, soit parce que l'extrémité supérieure de la zone de risque croissant n'a pas encore été définie quantitativement (nouvelles entités) ou parce que la valeur actuelle est connue uniquement avec une grande incertitude (perte de diversité génétique). Ces deux limites (la biodiversité et les nouvelles entités) ont cependant été amplement dépassées : elles ne se trouvent plus dans l'espace de fonctionnement sûr. La transgression de ces limites reflète une perturbation humaine du système terrestre sans précédent et elle est associée à de grandes incertitudes scientifiques.

En somme, la mise à jour de septembre 2023 par le Stockholm Resilience Centre précise six limites planétaires dépassées depuis 2023, illustrées dans la figure 25 :

- **Le changement climatique** : la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a atteint 425 ppm et le forçage radiatif a augmenté de 2,72 W/m², dépassant largement les seuils de 350 ppm et 1,5 W/m²;
- **L'intégrité de la biosphère** : le taux d'extinction des espèces a dépassé 100 espèces par million par an et

l'indice d'intégrité de la biodiversité a chuté à 65 %, dépassant les seuils de 10 par million par an et 90 %;

- **La perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore :** les flux d'azote et de phosphore vers les océans ont atteint respectivement 150 et 11 Tg/an, dépassant les seuils de 62 et 6,2 Tg/an;
- **Le changement d'usage des sols :** la surface des forêts tropicales a diminué à 8,5 millions de km², dépassant le seuil de 9,5 millions de km²;
- **L'utilisation de l'eau douce :** le prélèvement annuel d'eau douce a atteint 4 600 km³, dépassant le seuil de 4 000 km³;
- **L'introduction d'entités nouvelles :** la concentration de plastique dans les océans a atteint 0,15 kg/m³, dépassant le seuil de 0,01 kg/m³.

Bref, six des neuf limites sont déjà dépassées, étant situées dans le niveau à « hauts risques ». Un bon exemple qui démontre qu'il est possible d'agir pour améliorer la situation de certaines limites, ce sont les niveaux d'ozone stratosphérique, quoiqu'ils soient légèrement en récupération, démontrant qu'il est possible d'agir pour améliorer la situation de certaines limites.

D'autres limites, telles que l'acidification de l'océan ou la charge d'aérosol atmosphérique sont en voie de dépassement sévère. Le niveau de dépassement a augmenté pour toutes les limites identifiées par le même groupe d'experts du SRC comme étant surutilisées en 2015, telle que la production

primaire³⁷, qui draine des fonctions de biosphère du système terrestre. [74]

D'ailleurs, comme on l'observe sur la figure 25 (voir « Biosphere Integrity »), cette limite qui se rapporte à l'intégrité de la biosphère (et de la diversité génétique) est également dépassée.

Ces dépassements vont dans le même sens que ceux représentés dans la modélisation du système terrestre de la figure 22, concernant les différents CTP et limites systémiques d'imminences variables.

Les figures 22 et 25 illustrent que les impacts anthropiques sur le système terrestre doivent être pris en compte dans le contexte de l'évaluation des risques liés à un système complexe. Ces limites planétaires dépassées impliquent toutes un risque de basculement du système Terre vers un état moins favorable à la vie humaine et à la biodiversité. Il est donc nécessaire de mettre à jour la manière de réaliser les évaluations des risques et de prendre des mesures urgentes pour réduire les pressions anthropiques sur le système Terre et préserver un espace de vie sûr pour l'humanité.

³⁷ La production primaire est le processus par lequel les organismes autotrophes, comme les plantes, les algues et certaines bactéries, synthétisent de la matière organique à partir de matière minérale et d'une source d'énergie, comme la lumière solaire ou des composés chimiques. La production primaire est la base de la chaîne alimentaire et du cycle du carbone dans les écosystèmes.

Nous suggérons donc d'appliquer aux CTP le processus de gestion des risques, abordé ci-haut, ce qui consisterait à identifier, analyser, évaluer, traiter et surveiller les risques associés à ces phénomènes. Pour aller plus en détail, mentionnons que l'évaluation des risques, à savoir la troisième étape du processus de gestion des risques, comprendrait elle-même les étapes suivantes :

1. **L'identification des dangers et des facteurs de risque** : il s'agit de déterminer quels sont les CTP potentiels, quelles sont les conditions qui peuvent les déclencher, quelles sont les conséquences possibles sur les systèmes naturels, sociaux et économiques, et quels sont les facteurs qui peuvent augmenter ou réduire la probabilité ou la gravité de ces conséquences.
2. **L'analyse et l'examen du risque** : il s'agit d'évaluer la probabilité et la gravité des conséquences liées aux CTP, en tenant compte des incertitudes, des scénarios et des modèles disponibles, ainsi que des avis d'experts. Il s'agit également de comparer les risques entre eux et de les hiérarchiser en fonction de leur importance.
3. **La détermination des moyens appropriés pour éliminer le danger ou pour maîtriser le risque** : il s'agit de définir les objectifs et les critères de gestion des risques, de choisir les options les plus efficaces et les plus efficaces pour prévenir, réduire, transférer ou accepter les risques, et de planifier et de mettre en œuvre les actions nécessaires.

L'évaluation des risques liés aux CTP peut également être utilisée pour déterminer les mesures à prendre pour réduire les risques et pour protéger les personnes et les biens. Ces mesures peuvent inclure :

- **L'atténuation du changement climatique** : il s'agit de réduire les émissions de GES et d'augmenter les puits de carbone, afin de limiter le réchauffement global et de réduire la probabilité de franchir les CTP;
- **L'adaptation au changement climatique** : il s'agit de modifier les systèmes naturels, sociaux et économiques, afin de réduire la vulnérabilité et d'augmenter la résilience aux effets du changement climatique, y compris aux CTP;
- **La préparation aux situations d'urgence et la réponse aux catastrophes** : il s'agit de renforcer les capacités et les mécanismes pour anticiper, prévenir, réagir et se remettre des situations d'urgence et des catastrophes liées aux CTP;
- **La réparation des pertes et préjudices** : il s'agit de fournir une compensation, une assistance ou une réhabilitation aux personnes et aux biens affectés par les CTP, lorsque les mesures d'atténuation et d'adaptation sont insuffisantes ou inefficaces.

Les gouvernements, les entreprises et les citoyens doivent agir rapidement pour limiter les émissions de GES et réduire leur empreinte carbone afin de réduire les risques associés aux CTP. Nous devons tous travailler ensemble

pour protéger notre planète et garantir un avenir durable pour les générations futures.

Dans cette foulée, neuf considérations pertinentes pour les politiques publiques et les CTP ont été initialement identifiés par Lenton et coll. (2008) [13]. Ces neuf considérations sont les suivantes :

1. La possibilité d'un changement climatique abrupt ou irréversible pourrait entraîner des conséquences graves pour la société et les écosystèmes;
2. L'incertitude sur le moment, l'ampleur et l'impact des CTP rendent difficiles l'évaluation des risques et la prise de décision;
3. Le caractère non linéaire et complexe du système climatique implique des interactions et des rétroactions entre les différents composants et processus;
4. La diversité des échelles spatiales et temporelles des CTP varient de régionales à globales et de décennales à millénaires;
5. La nécessité d'une approche préventive et précautionneuse vise à éviter ou à réduire les CTP plutôt qu'à les subir ou à s'y adapter;
6. La prise en compte des valeurs et des préférences des différents acteurs et parties prenantes peuvent avoir des perceptions et des intérêts divergents sur les CTP;

7. La mobilisation des connaissances scientifiques et des savoirs locaux peut contribuer à une meilleure compréhension et à une meilleure communication des CTP;
8. La coordination et la coopération entre les différents niveaux de gouvernance peuvent faciliter la mise en œuvre de mesures efficaces et équitables pour faire face aux CTP;
9. L'innovation et la créativité dans la conception et l'évaluation des politiques publiques peuvent permettre de trouver des solutions originales et adaptées aux CTP.

Il importe de prendre la pleine mesure de l'urgence climatique du fait de sa complexité, de sa gravité et de l'imminence de l'atteinte d'un réchauffement de 1,5 °C ou plus. Mais aussi, qu'entre-temps plusieurs points de bascule et limites terrestres peuvent être traversés. D'autres GES, notamment la vapeur d'eau, des interactions et des effets domino entrent également en ligne de compte dans la complexité d'ensemble des phénomènes en jeu.

Voilà qui fait réaliser que nos manières d'intervenir doivent être ajustées en conséquence, notamment en matière de politiques publiques ainsi que dans notre gestion des risques. Or, étant donné l'imminence, la gravité et l'ampleur de la problématique d'ensemble de même que la perte de contrôle à éviter, agir devient un impératif immédiat.

Certes, une certaine action se fait déjà. Mais force est de constater qu'elle est inefficace et non adaptée à la complexité, à la gravité et à l'imminence des enjeux. Un autre lieu d'intervention pertinent, ce sont les infrastructures, qui font l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 5

Impacts et interventions

Ce chapitre considère que l'urgence d'agir est immédiate et il envisage des pistes de solutions face aux risques de franchissement des CTP. Il montre que les infrastructures, qu'elles soient naturelles ou bâties, jouent un rôle clé pour favoriser un développement compatible avec le climat, en contribuant à la fois à l'atténuation³⁸ et à l'adaptation³⁹ au changement climatique.

Nous y soulignons également la nécessité d'adopter une approche globale, systématique et intégrée du développement de solutions, et notamment au point de vue des infrastructures. Une telle approche doit cependant tenir

³⁸ L'atténuation du changement climatique consiste à réduire les émissions de GES, qui sont la principale cause du réchauffement climatique et de ses effets. Les infrastructures peuvent contribuer à l'atténuation en améliorant l'efficacité énergétique, en développant les énergies renouvelables, en réduisant la consommation de combustibles fossiles, en capturant et stockant le CO₂, etc.

³⁹ L'adaptation au changement climatique consiste à réduire la vulnérabilité et à augmenter la résilience des populations, des territoires, des écosystèmes, etc., et cela, face aux impacts du changement climatique, tels que les sécheresses, les inondations, les vagues de chaleur, les incendies, etc. Les infrastructures peuvent contribuer à l'adaptation en renforçant la protection contre les aléas climatiques, en favorisant la gestion durable de l'eau, en préservant la biodiversité, en soutenant les moyens de subsistance, etc.

compte des interactions et des rétroactions entre les différents composants et processus du système climatique.

Ce chapitre propose aussi des actions sectorielles et transversales, voire holistiques, pour faire face aux risques de basculement climatique, en mobilisant les connaissances scientifiques, les savoirs locaux, les innovations technologiques, les outils de planification, les mécanismes de financement, etc.

Impacts sur les infrastructures

Le changement climatique, causé par l'activité humaine, rend la chaleur et les précipitations extrêmes plus fréquentes et plus intenses, qui ont d'ailleurs fait des ravages dans le monde entier en 2023.

À ce phénomène s'ajoute le dépassement de plusieurs points de bascule, qui peut avoir des impacts négatifs sur les infrastructures à la base de l'économie mondiale, sociale et civile. Il peut en effet en résulter des perturbations, des dommages, des coûts ou des risques accrus pour les secteurs clés, comme l'énergie, les transports, la communication, la santé, la sécurité, l'éducation, etc.

Autant les systèmes naturels que ceux d'origine humaine, et notamment les infrastructures, n'ont pas été conçus pour résister à des phénomènes climatiques aussi extrêmes, qui se manifestent par une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la variabilité des événements météorologiques, tels que les sécheresses, les inondations,

les tempêtes, les vagues de chaleur, les incendies de forêt, etc. Ces dérèglements climatiques peuvent affecter la performance, la fiabilité, la sécurité et la durabilité des infrastructures, en provoquant des perturbations, des dommages, des coûts ou des risques accrus pour les secteurs clés.

Par exemple, la fonte des calottes glaciaires peut entraîner une montée du niveau de la mer, elle-même pouvant ensuite menacer les infrastructures côtières, telles que les ports, les aéroports, les routes, les ponts, les centrales électriques, les hôpitaux, les écoles, etc. Ce phénomène de montée de la mer peut aussi réduire la capacité de transport, de production, de distribution et la consommation de biens et services, et ainsi augmenter les coûts de maintenance, de réparation, de renforcement ou de déplacement des infrastructures. Il peut en outre augmenter les risques d'inondation, d'érosion, de salinisation, de contamination ou de submersion des infrastructures, et affecter par ricochet la sécurité, la santé, la qualité de vie ou le bien-être des populations.

Voici un autre exemple d'incapacité à résister aux événements extrêmes : la multiplication des incendies de forêt amplifiés par le changement climatique ou le dépassement de certains points de bascule peuvent entraîner une perte de la biodiversité et de la capacité de stockage du carbone des écosystèmes forestiers, ce qui peut affecter les infrastructures liées au bois, à l'énergie, à la protection des sols ou à la régulation du climat. Les incendies de forêt peuvent réduire la disponibilité et la qualité des ressources forestières, énergétiques, récréatives, culturelles ou

environnementales, et accroître les coûts de gestion, de prévention, de lutte ou de restauration des écosystèmes. Ces impacts peuvent eux-mêmes augmenter les risques de dégradation, de déstabilisation, de pollution, d'érosion ou de contamination ou destruction d'infrastructures, et affecter la sécurité alimentaire, la diversité culturelle, l'identité territoriale ou la justice sociale des populations.

Les infrastructures sont l'épine dorsale de l'économie mondiale, reliant les gens, améliorant la qualité de vie et promouvant la santé et la sécurité. Or, le changement climatique est un révélateur de vulnérabilités dans les infrastructures.

Les systèmes d'infrastructures correspondent à l'ensemble des structures physiques et numériques qui soutiennent les activités humaines (telles que l'énergie, les transports, la communication, la santé, la sécurité, l'éducation, etc.). Ces systèmes sont essentiels pour le développement mondial, car ils contribuent à la croissance économique, au bien-être social, à la protection de l'environnement et à la réduction de la pauvreté.

Des impacts négatifs sur ces infrastructures peuvent se manifester à la fois aux niveaux local et global, et affecter la résilience, la performance, la compétitivité et la durabilité des systèmes sociotechniques.

Les retombées du changement climatique ont mis en lumière le fait que les systèmes d'infrastructures qui soutiennent le développement mondial n'ont pas été construits

pour résister à cette réalité climatique de plus en plus extrême, et les investissements qui ont été réalisés dans ce domaine ont été moins qu'utiles. Nous devons anticiper et mieux nous préparer aux impacts qui se produisent dans les zones communautaires pour que nous puissions enfin y faire face avec sérieux, et efficacement, de sorte à réduire leurs conséquences ou même à arrêter ou ralentir leurs pires résultats. [25, 26, 27, 28 et 29].

Insuffisance des investissements

En somme, les investissements réalisés à ce jour dans ces systèmes d'infrastructures ont été insuffisants pour faire une différence significative. En effet, selon un rapport intitulé *Les infrastructures et la lutte contre les changements climatiques* publié par l'UNOPS, le PNUE et l'Université d'Oxford, les investissements actuels sont loin d'être suffisants, et il faudrait investir environ 90 000 milliards de dollars dans les infrastructures d'ici 2030 dans le monde pour atteindre les objectifs de développement durable et ceux de l'Accord de Paris. [41]

De plus, les investissements n'ont pas pris en compte les impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures ni la réduction des émissions de GES liées aux infrastructures. En d'autres termes, il faut à la fois investir dans la résilience des infrastructures et dans la réduction de leur empreinte carbone.

Cependant, nous essayons souvent de mettre au point des aides à la décision appropriées malgré des décennies de

sous-financement, alors que l'industrie des combustibles fossiles est constamment surfinancée, année après année.

Dans son dernier document de travail, le FMI indique que, à l'échelle mondiale, les subventions aux combustibles fossiles s'élevaient à sept milliards de dollars en 2022, soit 7,1 % du PIB. Les subventions explicites (faisant l'objet d'une sous-imputation⁴⁰ aux coûts d'approvisionnement) ont plus que doublé depuis 2020, mais ne représentent toujours que 18 % de la subvention totale, tandis que près de 60 % sont dues à la sous-imputation au réchauffement climatique et à la pollution atmosphérique locale. Cette sous-imputation locale est un problème majeur, car elle empêche de prendre en compte les coûts réels et les bénéfices potentiels de l'action climatique.

Le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique sont liés, car ils sont causés par les mêmes sources d'émissions, et ils ont des impacts négatifs sur la

⁴⁰ La sous-imputation est un concept économique qui a lieu lorsque les agents qui produisent ou consomment un bien ou un service ne prennent pas en compte les coûts ou les bénéfices externes qu'ils imposent ou qu'ils procurent à la société. Par exemple, une entreprise qui émet des GES ou des polluants atmosphériques ne paie pas le coût des dommages qu'elle cause au climat ou à la santé des populations. De même, un consommateur qui utilise un mode de transport propre ou qui réduit sa consommation d'énergie ne reçoit pas le bénéfice de la réduction des émissions ou de la pollution qu'il génère. La sous-imputation entraîne une inefficacité et une inégalité dans l'allocation des ressources, car elle conduit à une surproduction ou à une surconsommation des biens ou services, qui ont chacune des effets négatifs externes; la sous-imputation conduit aussi à une sous-production ou à une sous-consommation des biens ou services, qui ont des effets positifs externes.

santé, l'environnement, l'économie et la société. Selon un rapport de la Banque mondiale [49], le coût des conséquences sanitaires de la pollution atmosphérique est estimé à 8 100 milliards de dollars par an, soit 6,1 % du PIB mondial. Selon un rapport du GIEC [7], le coût des dommages causés par le changement climatique pourrait atteindre 54 000 milliards de dollars d'ici 2100, si la température moyenne augmente de 4 °C par rapport au niveau préindustriel. À l'inverse, réduire les émissions de GES et les polluants atmosphériques pourrait avoir des bénéfices importants, tant pour le climat que pour la qualité de l'air.

Selon une autre étude de la [Banque Mondiale](#) [46] et une du PNUE [44], réduire les émissions de certains polluants de courte durée de vie, comme le CH₄ ou les suies, pourrait éviter 2,4 millions de décès prématurés par an dus à la pollution de l'air, et pourrait aussi réduire le coût des conséquences sanitaires de la pollution atmosphérique, qui est estimé à 8 100 milliards de dollars par an, soit 6,1 % du PIB mondial.

Pour corriger la sous-imputation au réchauffement climatique et à la pollution atmosphérique locale, il faut mettre en place des politiques publiques qui internalisent les coûts à payer et les bénéfices externes à recevoir. Parmi ces politiques, on peut citer :

- La taxation des émissions de GES et des polluants atmosphériques, qui consiste à faire payer un prix

pour chaque unité d'émission proportionnel au coût social qu'elle engendre;

- La réglementation des émissions de GES et des polluants atmosphériques, qui consiste à fixer des normes ou des limites d'émission, qui doivent être respectées par les agents sous peine de sanctions;
- Le marché des permis d'émission de GES et des polluants atmosphériques, qui consiste à créer un système d'échange de droits d'émission, qui sont attribués ou vendus aux agents, et qui peuvent être achetés ou vendus selon les besoins;
- Les subventions ou les incitatifs au développement et à l'adoption de technologies propres ou de comportements écoresponsables, qui consistent à réduire le coût ou à augmenter le revenu des agents qui adoptent des solutions qui réduisent les émissions de GES ou la pollution.

En ce qui touche les subventions, celles qui sont données aux combustibles fossiles sont particulièrement significatives. Elles représentent des aides financières substantielles accordées par les gouvernements ou d'autres entités pour réduire le prix des carburants fossiles (comme le pétrole, le charbon ou le gaz naturel) ou pour augmenter la rentabilité de leur production ou de leur consommation. Elles peuvent prendre la forme de subventions directes, de prêts à faible taux d'intérêt, de réductions d'impôts, de garanties de prix, etc. Ces subventions représentent également, sur un plan plus global, un coût fiscal important, qui réduit alors les marges de manœuvres budgétaires et les possibilités d'investir dans d'autres secteurs prioritaires, tels

que la santé, l'éducation ou les énergies renouvelables. Elles ont bien entendu des effets négatifs sur l'économie, la société et l'environnement, car elles encouragent la surconsommation de ces carburants responsables d'une grande partie des émissions de GES, de la pollution de l'air, de la dégradation des ressources naturelles et de la dépendance énergétique.

Les sept milliards confirmés par le FMI [65] incluent à la fois les subventions explicites (qui correspondent à la différence entre le prix payé par les consommateurs et le coût d'approvisionnement des carburants fossiles), ainsi que les subventions implicites (qui correspondent à la différence entre le prix payé par les consommateurs et le prix social optimal⁴¹ des carburants fossiles) (voir figure 26 à la page 147). Le prix social optimal tient compte des coûts environnementaux et fiscaux associés à leur consommation.

Mais un des éléments les plus troublant du rapport du FMI est que les subventions explicites ont plus que doublé depuis 2020, passant de 0,6 milliard de dollars à 1,3 milliard

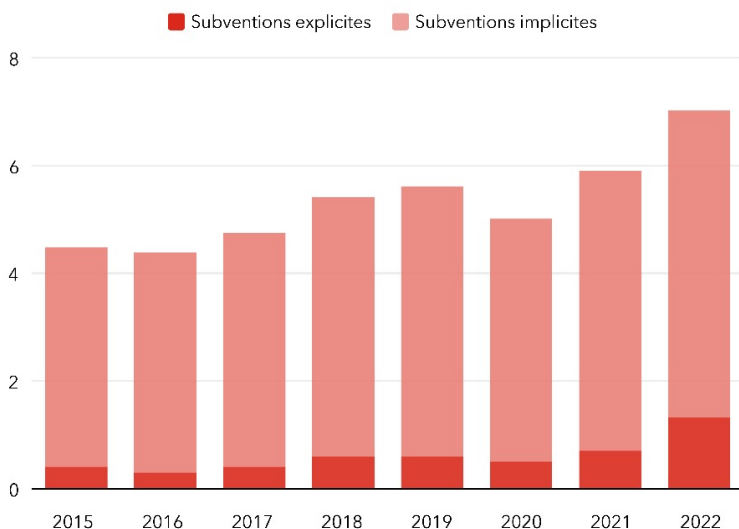
⁴¹ Le prix social optimal des carburants fossiles est le prix qui reflèterait le coût réel de leur consommation pour la société et l'environnement. Il est calculé en ajoutant au coût d'approvisionnement des carburants fossiles une taxe qui représente les dommages causés par leur utilisation. Le FMI estime que cette taxe devrait être de 57 dollars par tonne de CO₂ émis en 2021, et augmenter progressivement pour atteindre 75 dollars par tonne en 2030. Le FMI considère que le prix social optimal des carburants fossiles est un instrument efficace pour réduire la demande de ces carburants, pour encourager les énergies renouvelables, pour améliorer la qualité de l'air et du climat et pour générer des recettes fiscales.

de dollars, en raison de la hausse des prix mondiaux des carburants fossiles et des mesures de soutien prises par certains pays pour faire face à la crise économique et sociale provoquée par la pandémie de Covid-19. Cependant, les subventions explicites ne représentent toujours que 18 % de la subvention totale (de plus de 7 milliards), tandis que près de 60 % correspond à une sous-imputation au réchauffement climatique et à la pollution atmosphérique locale, qui sont les principaux coûts environnementaux liés à la consommation de carburants fossiles. Cette sous-imputation ne doit pas être sous-estimée, car elle est à la base du peu de considération de la part du système financier mondial envers les conséquences environnementales de l'usage inconsidéré des carburants fossiles.

Allant dans le même sens que le FMI, un rapport de l'AIE [40], publié en février 2023, soulignait que les subventions mondiales à la consommation de combustibles fossiles ont dépassé les mille milliards de dollars en 2022, de loin le montant annuel le plus élevé jamais enregistré. Ce chiffre représente une augmentation de 100 % par rapport à 2021, et de 150 % par rapport à 2019, avant la pandémie de Covid-19. Cette hausse s'explique principalement par la flambée des prix mondiaux des carburants fossiles, qui a incité de nombreux pays à intervenir pour soutenir les consommateurs et atténuer les pressions inflationnistes.

Les subventions aux combustibles fossiles ont dépassé 7 000 milliards de dollars l'an passé

(total des subventions aux combustibles fossiles, en milliers de milliards de dollars)



Source : calculs des services du FMI.

Note : Les chiffres pour 2019 et les années suivantes sont obtenus à partir de projections sur l'usage des combustibles. Subventions explicites : sous-tarification des coûts d'approvisionnement.

Subventions implicites : sous-tarification des coûts environnementaux et manque à gagner pour les recettes tirées de la fiscalité de la consommation, une fois pris en compte les mécanismes de fiscalité des combustibles et de tarification du carbone existants.

IMF

Figure 26 – Subventions aux combustibles fossiles. Elles ont augmenté de 2 000 milliards de dollars ces deux dernières années. Source FMI (2023) [65].

Le rapport montre que les « aides à la consommation » [40] de gaz et d'électricité ont doublé, et les aides à la consommation de pétrole ont augmenté d'environ 85 %. Les pays en développement sont les principaux bénéficiaires de ces subventions, notamment en Asie, en Afrique et au Moyen-Orient. Toute aide à la consommation incite à

consommer davantage d'énergies fossiles. Les subventionner réduit les sommes disponibles à des fins plus constructives, notamment pour adapter les infrastructures ou pour réduire leur empreinte carbone.

Un second rapport de l'AIE [63], publié en novembre 2023, évaluait que les subventions aux combustibles fossiles ont atteint 54 milliards de dollars en 2022, soit 0,05 % du PIB mondial. Ce chiffre se base uniquement sur les subventions explicites, qui sont mesurées à partir des données officielles des pays et des organisations internationales (voir figure 26, considérant les barres du diagramme correspondantes aux sources d'énergie suivantes : Pétrole en bleu ciel, Gaz naturel en bleu foncé, Électricité en vert clair, et Charbon en vert foncé).

Le premier rapport de l'AIE en 2023 [40] soulignait aussi que les subventions aux combustibles fossiles sont inefficaces et nuisibles, et qu'elles vont à l'encontre des objectifs de développement durable et de l'Accord de Paris sur le climat. Le rapport de l'AIE recommande de réformer ces subventions en mettant en place une tarification efficace des carburants, c'est-à-dire qui reflète leur coût social optimal, et recommande aussi d'accompagner cette réforme par des mesures de protection sociale et de redistribution pour atténuer son impact sur les ménages et les entreprises les plus vulnérables.

Le deuxième rapport de l'AIE souligne que les subventions aux combustibles fossiles sont en contradiction avec les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat, qui vise

à limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C. Il recommande donc de supprimer progressivement ces subventions et de les remplacer par des mesures de soutien aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.

Dans la même foulée, le FMI recommande de réduire progressivement les subventions aux combustibles fossiles en mettant en place une tarification efficace des carburants, c'est-à-dire, qui refléterait leur coût social optimal, et en accompagnant cette réforme par des mesures de protection sociale et de redistribution pour atténuer son impact sur les ménages et les entreprises les plus vulnérables.

Quoique les derniers rapports du FMI et de l'AIE sur les subventions aux combustibles fossiles présentent des méthodes distinctes, et donc aboutissent à des chiffres quelque peu différents⁴², ils convergent vers le même constat : ces subventions sont très élevées et nuisent à la lutte contre le changement climatique.

Le rapport du FMI appelle à une réforme des subventions aux combustibles fossiles, laquelle permettrait d'améliorer la qualité de l'air, de générer des recettes et de contribuer de manière décisive à ralentir le changement climatique.

Les deux rapports (du FMI et de l'AIE) s'accordent donc sur la nécessité de réduire drastiquement les subventions aux

⁴² Les rapports diffèrent quant à la méthode de calcul et l'ampleur du problème, ce qui peut s'expliquer par les sources de données utilisées, les hypothèses retenues et les définitions adoptées, mais ils convergent en ce qui concerne leurs conclusions.

combustibles fossiles, qui représentent un obstacle majeur à la transition énergétique et à la protection de l'environnement. Selon l'AIE et le FMI, une réforme aussi drastique permettrait de réduire les émissions mondiales de CO₂ de 36 %, d'augmenter les recettes publiques de 3,8 % du PIB mondial et d'éviter 0,9 million de décès prématurés dus à la pollution atmosphérique locale. (Voir figure 27 à la page suivante)

On pourrait aussi ajuster les différences entre les prix effectifs et les prix de détail des carburants, qui demeurent importantes et omniprésentes, en raison de la sous-imputation traitée plus haut, en incluant le prix social optimal, qui considère l'impact des combustibles fossiles afin de mieux refléter les coûts d'approvisionnement et environnementaux; et on pourrait aussi offrir des subventions implicites en facturant un prix inférieur au prix du carburant efficient. Ce serait une voie plus soutenable à considérer, selon le FMI [31].

Subventions à la consommation de combustibles fossiles par combustible

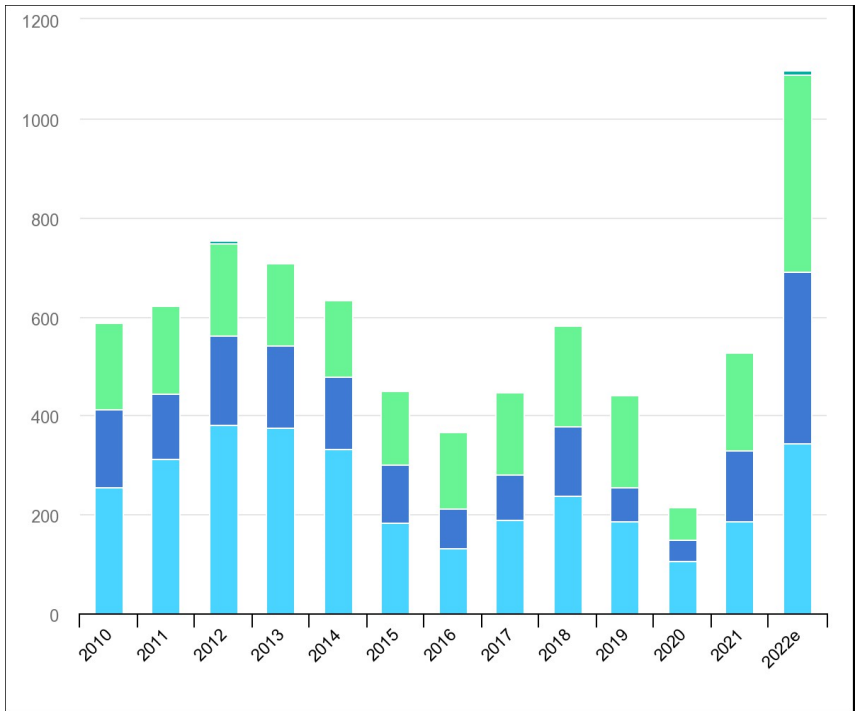


Figure 27 – Subventions à la consommation de combustibles fossiles par combustible 2010-2022. Légende : Pétrole en bleu ciel, Gaz naturel en bleu foncé, Électricité en vert clair et Charbon en vert foncé. Source : IEA. Licence : CC BY 4.0 [43].

Agir efficacement pour le climat, c'est possible

On l'a déjà dit, la traversée d'un des points de bascule pourrait entraîner des conséquences catastrophiques pour la société humaine et la planète. Le GIEC a averti qu'un

réchauffement supérieur à 2 °C pourrait entraîner des conséquences dévastatrices, et il fait valoir que nous devons maintenir le réchauffement climatique à 1,5 °C.

Le monde est actuellement en voie de dépasser ces deux limites de température, comme en font foi différents articles⁴³ parus juste avant la COP28, rapportant que la température moyenne de la planète a dépassé pour la première fois le seuil des 2 °C d'augmentation par rapport à l'ère préindustrielle, selon les données du service européen Copernicus (voir figure 28 à la page suivante). Et ce, même si des points de bascule peuvent également être dépassés plus tôt que le moment d'atteindre cette limite, voire que ce dépassement est déjà effectif. La bonne nouvelle, c'est que nous pouvons encore faire quelque chose.

Puisque plusieurs autres points de bascule pourraient être franchis de façon imminente, il faut mettre en place une action climatique complète, qui implique non seulement de réduire notre empreinte environnementale, mais aussi d'avoir une réponse efficace et rapide. Une action climatique complète consiste à adopter des mesures d'atténuation, d'adaptation, de préparation et de réparation, qui visent à limiter le réchauffement global, à réduire la vulnérabilité

⁴³ L'article de l'*Agence Science Presse* rapporte que le 17 novembre 2023, la température moyenne de la planète a dépassé pour la première fois le seuil des 2 °C d'augmentation par rapport à l'ère préindustrielle, selon les données du service européen Copernicus. Il souligne que ce dépassement est temporaire et ne signifie pas que le seuil est franchi de façon permanente, mais il illustre l'urgence d'agir pour réduire les émissions de GES et l'importance de respecter les objectifs de l'Accord de Paris sur le climat.

aux effets du changement climatique, à renforcer la résilience aux situations d'urgence et à fournir une assistance aux personnes et aux biens affectés par le dépassement des CTP.

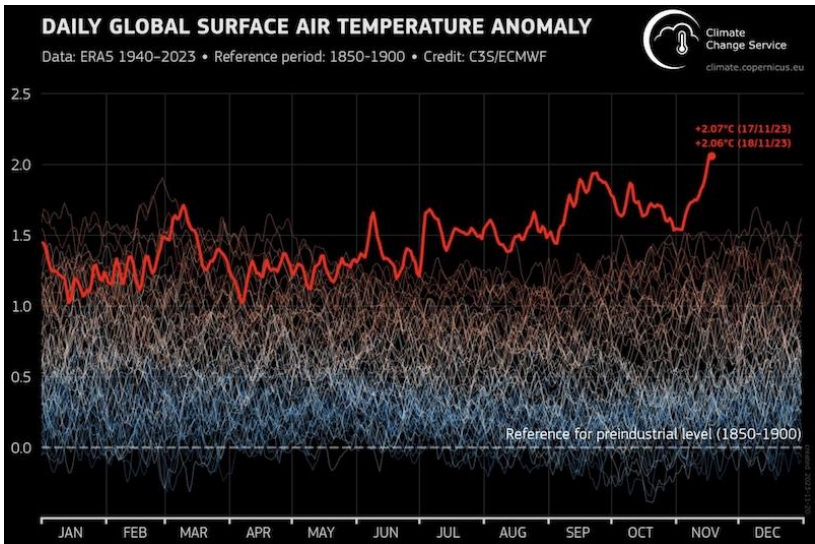


Figure 28 – Mesures de température de surface globale des 17 et 18 novembre 2023. Source : Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (en anglais : ECMWF), qui dépend de l'Union européenne.

Réduire notre empreinte environnementale implique de réduire les émissions de GES et d'augmenter les puits de carbone, afin de limiter le réchauffement global et de réduire la probabilité de franchir des CTP. Cela implique également de réduire la pollution de l'eau et des sols, par les plastiques,

les produits chimiques, les métaux lourds, etc., qui peut affecter la biodiversité, la santé et la qualité de vie.

Avoir une réponse efficace et rapide implique de travailler de concert avec les systèmes naturels, sociaux et économiques, afin de réduire la vulnérabilité de certaines populations et écosystèmes, et d'augmenter la résilience aux effets du changement climatique, y compris aux CTP. Cela implique également de renforcer les capacités et les mécanismes pour anticiper, prévenir, réagir et se remettre des situations d'urgence et des catastrophes liées aux CTP. Une telle réponse suppose enfin de fournir une compensation, une assistance ou une réhabilitation aux personnes et aux biens affectés par les CTP, lorsque les mesures d'atténuation et d'adaptation sont insuffisantes ou inefficaces. Ceci suppose plus que des connaissances; notamment, des capacités opérationnelles axées sur l'action.

Sans ces capacités éprouvées, toute réponse risque d'être retardée, permettant aux crises de dégénérer davantage. Par conséquent, alors que nous nous préparons à de futures et multiples crises climatiques, nous devons passer de notre objectif de simplement accumuler des connaissances à celui de renforcer activement la capacité d'agir⁴⁴ à tous les niveaux (individuel, collectif et institutionnel).

⁴⁴ La capacité d'agir est la possibilité pour les acteurs sociaux de participer aux décisions et aux actions qui concernent leur avenir, en particulier face aux enjeux environnementaux. Elle implique des compétences, des connaissances, des valeurs, des motivations et des opportunités qui favorisent l'engagement et la mobilisation pour la transition écologique. La capacité d'agir peut se manifester à différentes

La capacité d'agir est clé pour faire face aux crises climatiques, car sa présence permet de réduire le sentiment d'impuissance, d'incertitude ou d'anxiété que peuvent provoquer ces crises [25, 26 et 30]. Elle permet aussi de renforcer la résilience, la solidarité et la créativité des individus et des communautés face aux perturbations climatiques. Elle contribue enfin à accélérer la transition vers des modes de vie et de production plus durables et plus équitables. Face aux crises climatiques, il ne suffit pas de se contenter de collecter des informations, il faut aussi développer des compétences et des moyens pour agir efficacement et rapidement. Ces capacités d'agir peuvent être individuelles ou collectives, et concernent différents domaines, tels que la compréhension des enjeux, la mobilisation des acteurs, la mise en œuvre des solutions, l'évaluation des impacts, etc. Ces capacités d'agir sont nécessaires pour éviter que les crises climatiques ne s'aggravent et ne dépassent les seuils de résilience des systèmes naturels et sociaux.

Renforcer activement la capacité d'agir implique de favoriser l'apprentissage, l'innovation, la participation, la coopération et la responsabilisation des individus et des groupes face aux défis climatiques. Cela implique également de créer des conditions favorables à l'action, comme des cadres juridiques, institutionnels, financiers, éducatifs, etc., qui soutiennent et encouragent les initiatives visant à réduire les émissions de GES, à s'adapter aux effets du changement climatique, à prévenir et à gérer les risques et les

échelles, depuis les gestes quotidiens jusqu'aux initiatives collectives ou aux politiques publiques.

catastrophes, et à réparer les pertes et les dommages. Renforcer activement la capacité d'agir peut rendre politiquement plus facile la mise en œuvre d'une action climatique complète, car cela peut contribuer à :

- Sensibiliser et mobiliser les citoyens, les organisations et les décideurs concernant l'urgence et la nécessité d'agir contre les crises climatiques;
- Créer une confiance et une solidarité entre les acteurs, en favorisant le dialogue, la concertation et la transparence;
- Renforcer la légitimité et la crédibilité des actions, en s'appuyant sur des connaissances scientifiques, des expériences locales, des valeurs partagées et des objectifs communs;
- Accroître l'efficacité et l'efficience des actions, en mobilisant les ressources, les compétences, les innovations et les synergies disponibles;
- Améliorer la résilience et la durabilité des actions, en tenant compte des incertitudes, des risques, des opportunités et des impacts à court et à long terme.

Il existe une approche appelée « processus d'anticipation »⁴⁵, habituellement appliquée, notamment,

⁴⁵ Le processus d'anticipation est une démarche centrée sur l'action anticipée, qui vise à se projeter dans le futur en tenant compte des connaissances scientifiques disponibles, des incertitudes et des opportunités, et à agir en conséquence pour prévenir ou atténuer les risques, pour favoriser les innovations et pour renforcer les capacités d'adaptation. Cette approche est fondée sur le principe que l'anticipation n'est pas seulement une activité cognitive mais aussi une pratique sociale

aux marchés financiers et à la sécurité routière ou même à la gestion de crises. Nous suggérons de l'appliquer à la lutte au climat. Le fait que cette approche soit centrée sur l'action anticipée et la science nous apparaît comme étant une clé pour gérer efficacement les futures crises liées au climat, voire pour représenter un fondement des systèmes de réponse, à la fois locaux et globaux, capables de faire face à un éventail de crises potentielles dans des systèmes particulièrement complexes. En effet, en anticipant les scénarios possibles et souhaitables du futur, adopter une telle approche permettrait de :

- Repérer les signaux faibles, les tendances et les ruptures, qui peuvent annoncer ou provoquer des crises, qu'elles soient environnementales, sanitaires, économiques, sociales ou politiques;
- Développer des stratégies et des actions préventives, proactives et adaptatives pour réduire la vulnérabilité, augmenter la résilience et favoriser la transformation des systèmes face aux crises;
- Mobiliser des savoirs, compétences, valeurs et motivations d'acteurs locaux et globaux pour coconstruire des visions partagées, des solutions innovantes et des modes de gouvernance inclusifs et responsables.

Des systèmes complexes, tels que le climat, et qui présentent des risques extrêmes, peuvent se transformer en

qui implique la participation et la collaboration des acteurs concernés par les enjeux du futur.

échecs catastrophiques advenant que dès le début soient laissés sans réponse des points de bascule qui constituent de véritables alarmes antidépassement. Ces échecs peuvent survenir en atteignant des instabilités et des points de bascule qui entraînent des pertes abruptes de bien-être ou de résilience à grande échelle, que ce soit un écosystème ou un système social tel qu'une nation.

Risques non linéaires

Une part importante de la complexité du système climatique vient de ce qu'il se compose de risques non linéaires. Une mauvaise compréhension des risques non linéaires est apparente depuis des années dans la lutte au changement climatique, mais elle l'a aussi été au cours de la récente pandémie (Covid-19), où ceux qui ont appelé à une précaution accrue étaient souvent accusés d'être alarmistes ou de générer de la « peur » [37 et 79].

Il importe de rappeler que les risques non linéaires ne sont pas proportionnels à leurs causes : ils peuvent être de plus grande ou de plus petite importance et néanmoins entraîner des conséquences catastrophiques et irréversibles. Par exemple, le dépassement de points de bascule ou de limites planétaires peut provoquer des changements abrupts et imprévisibles dans le système climatique, tels que la fonte des calottes glaciaires, la disparition des récifs coralliens ou l'effondrement de la circulation océanique.

Dans la lutte au changement climatique, la mauvaise compréhension de ces risques non linéaires est apparente

depuis des années, car de nombreux pays et acteurs n'ont pas pris les mesures nécessaires pour réduire les émissions de GES et pour s'adapter aux impacts du réchauffement. Certains ont même nié l'existence ou la gravité du problème, ou ont privilégié des intérêts économiques ou politiques à court terme au détriment du bien-être et de la sécurité à long terme de la planète et de ses habitants. Alors que s'efforcer de bien comprendre les risques non linéaires participerait à déclencher une volonté plus ferme de les contrer, voire de prévenir ceux qui restent à venir.

Pour prendre un parallèle, la pandémie de Covid-19 a également révélé la difficulté de gérer les risques non linéaires dans le domaine de la santé publique. Les intervenants qui ont appelé à une précaution accrue ou à la mise en place de mesures de protection se voyaient souvent accusés d'être des alarmistes ou de générer inutilement de la « peur », alors qu'ils cherchaient à éviter une propagation incontrôlée du virus et une saturation des systèmes de santé, ce qui s'est ultérieurement confirmé comme étant une situation à laquelle il aurait valu être mieux préparé. Si la crainte qu'une incitation à adopter des mesures d'urgence fasse éclater peur ou panique collective a motivé les dirigeants de la Santé, cette réaction ne s'est pas manifestée. En revanche, des millions de morts dans le monde ont tristement été confirmés lors de cette pandémie. Il s'agissait d'une mauvaise interprétation des réactions humaines.

Du côté des intervenants du climat, il y a peut-être aussi de cette crainte de semer une panique générale advenant des catastrophes extrêmes et une perte de contrôle à composer avec elles. En tout cas, la lutte climatique semble faire

l'objet d'un rejet semblable des mesures de précaution à celui s'étant manifesté lors de la pandémie de Covid-19.

Pourtant, contrairement à la croyance populaire, les gens ne paniquent généralement pas en cas d'urgence. Au lieu de cela, ils ont habituellement tendance à réagir de manière constructive et coopérative, en autant qu'ils ont reçu des informations claires et précises. Ce sont les mots clés ici pour bien faire : une information juste et claire. La croyance généralisée en une panique de masse pendant des catastrophes appartient à un groupe d'idées fausses, étudiées en psychologie sociale sous le terme parapluie des « mythes en cas de catastrophe » (ou « Disaster Myths ») [77, 78 et 79].

Le vrai danger réside dans la création d'un faux sentiment de sécurité. Par exemple, en martelant que cela n'affectera « que » les générations suivantes, ou que « ce n'est pas imminent ». Si un tel sentiment qu'il y a amplement de temps pour réagir est brisé en raison d'un événement inattendu et d'un manque de préparation, les retombées peuvent être beaucoup plus dommageables en termes d'impact physique, mental et économique qu'on a pu le soupçonner, sans parler de la perte de confiance ou du sentiment de trahison pouvant alors s'ensuivre.

Pour faire face aux risques non linéaires, liés au changement climatique (en parallèle à ceux s'étant présentés lors de la pandémie de Covid-19), il faut une coopération internationale, un leadership éclairé, une mobilisation citoyenne, une prévention proactive, une résilience

collective et une solidarité humaine. Il convient également de renforcer les connaissances scientifiques et les capacités d'anticipation, de détection et de réaction aux signaux d'alerte précoces. Il importe de saisir les opportunités de transformation positive qui peuvent émerger des crises, comme la transition vers une économie verte et inclusive.

Un exemple d'opportunité vient d'un autre élément similaire entre la crise climatique et la pandémie. Ces deux crises mettent également en évidence les inégalités sociales et les vulnérabilités des populations les plus exposées aux effets sanitaires, économiques et psychologiques de la crise. Cette mise en lumière peut devenir une réelle opportunité permettant de mieux répondre aux besoins et aux aspirations des populations les plus vulnérables et de réduire les iniquités.

Aussi, la recommandation générale pour une communication constructive et proactive est de ne pas minimiser les menaces. Au lieu de cela, les autorités doivent offrir au public des informations claires quant aux risques potentiels et à leur imminence probable et surtout, des conseils sur la façon de préparer et de répondre efficacement. Cette direction a le potentiel de transformer l'anxiété et la passivité en une action auto-organisée positive, tout comme la recherche et l'implantation de solutions créatives et collaboratives, qui sera le sujet de la dernière section du chapitre.

Applications concrètes et efficaces

Adoption d'une approche holistique

La biosphère est menacée par de nombreux bouleversements, dont le changement climatique anthropique déjà en cours et des dérèglements mondiaux liés aux points de bascule. Voici des exemples de ces bouleversements : la réduction de l'albédo lié à la couverture glaciaire terrestre, la perte de biodiversité et l'intensification de la production agricole. Les implications de ces aspects spécifiques du changement environnemental sont complexes par nature et ne sont pas immédiatement évidentes. Par conséquent, il est difficile d'obtenir une image plus globale de ce que ces changements impliquent, de façon à distinguer les éléments plus ou moins bénéfiques des préjudices marqués, et notamment en ce qui concerne l'impact sur l'humain ou la société.

Il importe donc d'approcher la problématique des menaces à la biosphère de façon holistique et innovatrice, ce qui nous permet d'obtenir une image plus vaste et de l'utiliser pour comprendre comment la biosphère terrestre peut être maintenue ou sauvegardée malgré une activité humaine trop intense et amplifiée et qui devra être contrôlée.

Une telle approche holistique s'inscrit dans une vision systémique de la relation entre l'humanité et la nature, qui reconnaît la valeur intrinsèque de la vie et la nécessité de préserver les fonctions et les services écosystémiques.

Utilisée pour minimiser les impacts climatiques, elle consiste à prendre en compte les interactions entre les différents éléments du système Terre, comme l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la géosphère, ainsi que les activités humaines qui les affectent. Elle implique également de reconnaître la complexité et la non-linéarité des processus qui régissent le climat et ses changements, et de chercher des solutions adaptées aux contextes locaux et globaux.

Plus concrètement, pour éviter l'utilisation de matériaux rares, par exemple dans la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques, l'approche holistique préconisée pourrait mettre l'accent sur l'énergie générée par la photosynthèse – énergie nécessaire pour maintenir à la fois l'activité métabolique dissipative des écosystèmes et des activités humaines (le taux de génération étant limité par les contraintes physiques de l'environnement).

L'utilisation de la photosynthèse sera davantage élaborée dans une prochaine et dernière section du chapitre. Mais nous pouvons en dire quelque peu pour le moment.

L'énergie générée par la photosynthèse est l'énergie chimique stockée dans les molécules organiques, comme le glucose, qui sont synthétisées à partir de l'eau et du dioxyde de carbone grâce à l'énergie solaire. Cette énergie est nécessaire pour maintenir l'activité métabolique dissipative des écosystèmes et des activités humaines, c'est-à-dire, l'ensemble des processus qui consomment de l'énergie pour maintenir un état d'ordre et de complexité face à l'entropie.

Le taux de génération de cette énergie est limité par les contraintes physiques de l'environnement, comme la disponibilité de la lumière, de l'eau, du dioxyde de carbone, des nutriments et de la température.

En effet, l'influence humaine sur la biosphère peut avoir des effets néfastes ou bénéfiques sur la production et la consommation de cette énergie. Ces effets néfastes sont causés par une consommation humaine accrue de cette énergie libre (par exemple en agriculture intensive), qui entraîne une réduction de la biomasse végétale, une augmentation des émissions de GES, une dégradation des sols, une perte de biodiversité et un déséquilibre des cycles biogéochimiques. Les effets bénéfiques sont ceux qui permettent une activité plus photosynthétique et, par conséquent, une activité plus dissipative au sein de la biosphère, comme la restauration des écosystèmes, la promotion de l'agroécologie, la réduction de l'empreinte écologique et la transition vers des sources d'énergie renouvelables.

Pour en revenir aux services écosystémiques, ils sont essentiels à la vie humaine, mais ils sont souvent menacés ou dégradés par les activités humaines. Il est donc important de les protéger et de les gérer de façon durable. Les services écosystémiques sont les bénéfiques que les humains retirent des écosystèmes, comme la nourriture, l'eau, la régulation du climat, la pollinisation, la culture ou le loisir. Il existe quatre types principaux de services écosystémiques :

- **Les services d'approvisionnement :** Les produits obtenus à partir des écosystèmes, tels que les ressources génétiques, les fibres, le bois, les médicaments ou l'énergie;
- **Les services de régulation :** Les avantages obtenus de la régulation des processus écosystémiques, tels que la purification de l'air et de l'eau, la prévention de l'érosion, la protection contre les inondations ou les maladies ou la séquestration du carbone;
- **Les services de soutien :** Les fonctions nécessaires au maintien des autres services écosystémiques, telles que la formation des sols, le cycle des nutriments, la production primaire ou la biodiversité;
- **Les services culturels :** Les bénéfices non matériels que les humains tirent des écosystèmes, tels que l'esthétique, l'éducation, la spiritualité, le tourisme ou le bien-être.

Un exemple de cette approche holistique, c'est l'écologie intégrale, qui consiste à relier les approches, à intégrer les enjeux, à transformer les pratiques. Un article par Luyckx (2020) [66] présente l'écologie intégrale : celle-ci vise à articuler les dimensions environnementale, sociale, économique, politique et spirituelle de la relation à la nature. Cette approche peut également impliquer une responsabilité éthique et morale de l'humanité envers les générations présentes et futures. D'autres auteurs présentent leur vision de l'écologie intégrale, considérant nécessaire de placer le souci écologique au sommet, de l'utiliser comme critère d'acceptabilité des lois, des actions, des décisions économiques et politiques [67, 68 et 113].

Pour ajouter une autre lueur encourageante en termes d'action climatique plus efficace, il semble que des perturbations ou des dérèglements peuvent être renversés. À cet effet, on peut se référer à une étude publiée dans le *Journal of Geophysical Research* en janvier 2023 [6], qui a vérifié si des changements brusques de l'océan peuvent se produire sous des transitions du froid au chaud ou du chaud au froid dans la mer d'Amundsen, en Antarctique occidental. Ses auteurs utilisent un modèle océanique régional avec un ensemble de perturbations atmosphériques locales idéalisées pour caractériser les seuils et la réversibilité des changements brusques de l'océan. Ils ont constaté que la mer d'Amundsen actuellement chaude pourrait passer par intermittence ou de façon permanente à un état froid pour des perturbations atmosphériques relativement faibles et pourrait être légèrement plus chaude à l'avenir. Ceci donne à penser que de telles transitions peuvent être réversibles.

Pour continuer sur cette lancée encourageante, ajoutons deux autres exemples d'application d'une approche holistique et innovatrice que celui touchant la photosynthèse et présenté précédemment, concernant cette fois les lois de la thermodynamique et de la science du climat.

Les lois de la thermodynamique⁴⁶ sont fondamentales, et nous devrions toujours les garder à l'esprit lorsque nous intervenons sur la nature.

⁴⁶ Les lois de la thermodynamique sont des principes qui décrivent les transformations et les échanges d'énergie et de matière dans l'univers. Elles permettent de déterminer si un processus est spontané ou non, et quelle est la quantité d'énergie disponible pour effectuer un travail.

Or, la science du climat et celle de la thermodynamique fondamentale⁴⁷ devraient recouper la prise de décision concernant l'action climatique. Ceci, parce que ces deux sciences fournissent des connaissances, des données, des modèles, des outils, etc., et parce que ces derniers permettent de comprendre, d'anticiper et de gérer les impacts du changement climatique et de la transition énergétique. Plus précisément :

- La science du climat permet de projeter les scénarios futurs du climat en fonction des émissions de GES, et d'évaluer les risques et les opportunités associés à ces scénarios; elle permet ainsi d'orienter les politiques publiques visant à réduire les émissions, à s'adapter aux impacts ou à renforcer la résilience des populations et des écosystèmes;
- La thermodynamique permet de concevoir, d'optimiser, de contrôler et d'évaluer les systèmes énergétiques, qu'ils soient fossiles, renouvelables, nucléaires, etc.; elle permet ainsi de soutenir la transition vers des sources d'énergie plus propres, plus efficaces et plus durables, et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles;
- La science du climat et la thermodynamique utilisées de pair permettent de développer des solutions

⁴⁷ Le climat et la thermodynamique sont deux domaines scientifiques qui étudient les phénomènes physiques liés à l'énergie, à la température, à la pression, à l'entropie, etc. La science du climat s'intéresse aux variations du climat à différentes échelles spatiales et temporelles, et à leurs causes et conséquences. La thermodynamique s'intéresse aux transformations de l'énergie et aux lois qui les régissent.

innovantes et intégrées, qui combinent les aspects climatiques et énergétiques, telles que les infrastructures naturelles, les bâtiments intelligents, les réseaux électriques, les transports verts, etc.; elles permettent ainsi de favoriser un développement compatible avec le climat, et de répondre aux besoins actuels et futurs de la société.

Pour un exemple concret plus spécifique, touchant à la fois le climat et la thermodynamique, on peut penser à la science du feu, qui explore et interprète l'environnement du feu. Cette science comprend la teneur en humidité des combustibles forestiers importants et la facilité d'enflammer ces combustibles, ainsi que les caractéristiques des feux de forêt telles que la vitesse d'étalement, la longueur de la flamme et la profondeur de combustion dans le sol forestier. Ce domaine scientifique crée des outils prédictifs qui permettent aux gestionnaires des incendies d'estimer et de gérer les risques dans des scénarios d'incendie de forêt difficiles et complexes. Avec l'augmentation du risque d'incendie de forêt et de la complexité des activités de gestion des incendies, nous devons être en mesure de faire de meilleures prévisions du comportement des feux de forêt pour soutenir la planification et la prise de décisions en matière de feux de forêt. [21, 30, 99, 112]

Approche intégrée en matière d'infrastructures

Revenons aux infrastructures dans une optique de faire face aux défis climatiques actuels. Dans cette visée, il est nécessaire d'adopter une approche globale, systématique et

intégrée du développement des infrastructures, qui vise à renforcer la résilience au changement climatique, à réduire les émissions de GES, à favoriser l'innovation, à optimiser les coûts et les bénéfices et à impliquer les parties prenantes. Il faut également promouvoir les solutions d'infrastructures naturelles, qui utilisent les écosystèmes naturels ou restaurés pour fournir des services d'infrastructures, tels que la régulation du climat, la protection contre les inondations, la purification de l'eau, etc.

Ces solutions peuvent être complémentaires ou alternatives aux infrastructures bâties, qui sont notamment des constructions artificielles telles que les barrages, les routes, les ponts, etc. Les solutions d'infrastructures naturelles sont des biens ou des fonctions qui soutiennent le développement humain et le bien-être, et qui présentent aussi plusieurs avantages, tels que :

- Contribuer à la régulation du climat, en séquestrant le carbone, en réduisant les émissions de GES, en atténuant les îlots de chaleur, etc.;
- Protéger contre les inondations, en absorbant et en retenant l'eau, en réduisant le ruissellement, en stabilisant les sols, etc.;
- Purifier l'eau, en filtrant les polluants, en réduisant l'eutrophisation,⁴⁸ en améliorant la qualité des habitats aquatiques, etc.;

⁴⁸ L'eutrophisation est un phénomène qui consiste en l'accumulation excessive de nutriments tels que l'azote et le phosphore dans un milieu aquatique ou terrestre. Les nutriments en excès favorisent la croissance des plantes et des algues, ce qui peut entraîner une prolifération

- Offrir d'autres services écosystémiques, tels que la production de nourriture, de fibres, de médicaments, ainsi que la pollinisation ou le contrôle des ravageurs, la préservation de la biodiversité ou de la beauté de la nature, etc.;
- S'avérer plus flexibles, plus résilientes, plus durables et plus rentables que les infrastructures bâties, qui nécessitent plus de maintenance, de réparation et de remplacement.

Parmi les exemples d'infrastructures naturelles, on peut citer :

- Les toits et les murs verts, qui sont des surfaces végétalisées qui réduisent la température, la pollution et le bruit, et qui favorisent la biodiversité et l'esthétique;
- Les jardins de pluie, qui sont des bassins profonds qui recueillent et infiltrent l'eau de ruissellement, et qui réduisent les risques d'inondation et de pollution;

excessive de ces organismes et une diminution de la quantité d'oxygène disponible pour les autres organismes vivants du milieu. L'eutrophisation peut être causée par des activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et les eaux usées. Elle peut avoir des effets négatifs sur la biodiversité, la qualité de l'eau et la santé des animaux et des humains. Pour éviter ou éliminer l'eutrophisation, il est important de réduire les apports de nutriments dans les milieux aquatiques et terrestres.

- Les bassins d'eaux pluviales naturalisés, qui sont des plans d'eau artificiels qui imitent les caractéristiques des milieux humides, et qui améliorent la qualité de l'eau, la biodiversité et le paysage;
- Les zones côtières naturalisées, qui sont des zones où la végétation et les habitats naturels sont restaurés ou renforcés, et qui protègent le littoral de l'érosion, des tempêtes et de la montée du niveau de la mer;
- Et d'autres solutions d'implantation locale comme les forêts urbaines, les arbres dans les rues, les zones humides, les rigoles de drainage biologique et la restauration des zones naturelles.

Les infrastructures impliquent généralement d'importants investissements dans des actifs conçus pour fonctionner à long terme. Par exemple, les centrales électriques sont conçues pour durer de 40 à 50 ans, et les barrages hydroélectriques et les grandes structures géotechniques, pour une durée allant jusqu'à 100 ans. À ce jour, la conception de telles installations a généralement supposé un climat futur qui est à peu près le même qu'au moment de leur conception. Cependant, les phénomènes météorologiques plus extrêmes rendent ces facteurs de sécurité climatiques⁴⁹ (étant donné des moyennes de

⁴⁹ La sécurité climatique est un concept qui désigne les liens entre le changement climatique et la paix et la sécurité, en particulier dans les zones fragiles et touchées par des conflits. Le changement climatique peut exacerber les facteurs de tension et de violence, tels que la concurrence pour les ressources naturelles, la dégradation des moyens d'existence, les migrations forcées, les inégalités, etc. Il peut aussi aggraver ou prolonger les conflits existants et entraver les efforts de prévention et de résolution des conflits. À l'inverse, les conflits peuvent

températures ou de précipitations dépassées) désuets, laissant les infrastructures opérer en dehors de leurs niveaux de tolérance.

L'impératif de sécurité climatique est important : il met en évidence les risques et les opportunités que le changement climatique représente en matière de stabilité et de développement des pays et des régions. Afin de faire face aux défis actuels et à l'accélération des dérèglements climatiques, la sécurité climatique appelle à une approche intégrée et transversale, qui combine les dimensions environnementales, sociales, économiques et politiques des problèmes de sécurité. Une telle approche intégrée nécessite que soient renforcés la coopération et le dialogue entre les différents acteurs et niveaux de gouvernance, et que soient mobilisés les connaissances scientifiques, les savoirs locaux, les innovations technologiques, les mécanismes de financement, etc. Faire l'impasse sur ces visées lors de la conception des infrastructures peut présenter en soi des menaces directes pour les actifs ainsi que des répercussions importantes pour ceux qui dépendent des services que fournissent les infrastructures.

De plus, la coopération entre les différents acteurs est essentielle pour lutter contre le changement climatique et préserver la paix et la sécurité, en particulier dans les zones fragiles et touchées par les conflits. Il existe plusieurs moyens de renforcer la coopération, tels que :

perturber ou empêcher l'action climatique, en détruisant ou en bloquant les infrastructures, les services, les institutions, etc., nécessaires à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique.

- Développer des cadres et des mécanismes de dialogue, de coordination et de concertation entre les acteurs locaux, nationaux, régionaux et internationaux, qui tiennent compte des besoins, des intérêts et des capacités de chacun;
- Renforcer les capacités des acteurs à analyser, à anticiper et à gérer les risques climatiques et sécuritaires, en mobilisant les connaissances scientifiques, les savoirs locaux, les innovations technologiques, les outils de planification, etc.;
- Intégrer les dimensions climatiques et sécuritaires dans les politiques, les stratégies et les programmes de développement, en adoptant une approche globale, systématique et transversale, qui combine les aspects environnementaux, sociaux, économiques et politiques;
- Mobiliser les ressources financières, techniques et humaines nécessaires pour soutenir l'action climatique et la prévention des conflits, en favorisant les partenariats inclusifs, la transparence et la redevabilité mutuelle.

On ne peut pas s'attendre à ce que les divers intervenants⁵⁰ liées aux infrastructures parviennent à gérer

⁵⁰ La conception et l'opération des infrastructures impliquent la participation de nombreux intervenants, qui ont des rôles et des responsabilités différents. Parmi ces acteurs, on peut citer :

- **Le maître d'ouvrage** : Il s'agit de l'entité qui initie, finance et contrôle le projet d'infrastructure, en définissant ses objectifs, ses besoins, son budget, son calendrier, etc.; le maître d'ouvrage peut être public (une collectivité territoriale, un ministère, une

efficacement les risques associés à l'augmentation des événements extrêmes avec les mêmes vieux outils qu'ils utilisent depuis des décennies. Les gouvernements, et notamment par leurs politiques publiques, doivent prendre en compte ces risques.

En bref, étant donné l'accélération du changement climatique et l'imminence de points de bascule, il convient de considérer à la fois l'adaptation et l'empreinte carbone des infrastructures diverses de nos sociétés et d'investir à la hauteur des défis actuels. Ce qui suppose que les divers intervenants concernés agissent de manière globale et proportionnée, rigoureuse et planifiée, et cela, sans plus attendre. D'autant plus que, en considérant la durée sur

société d'État, etc.) ou privé (une entreprise, une association, un particulier, etc.);

- **Le maître d'œuvre** : Il s'agit de l'entité qui assure la conception technique, la direction et la coordination des travaux du projet d'infrastructure, en respectant le cahier des charges du maître d'ouvrage;
- **Les entreprises de construction** : Il s'agit des entités qui réalisent les travaux du projet d'infrastructure, en respectant les plans, les normes, les délais, etc. Les entreprises de construction peuvent être des entreprises générales, des sous-traitants, des fournisseurs, etc.;
- **Les exploitants** : Il s'agit des organisations publiques ou privées qui assurent le fonctionnement, la maintenance, la gestion et l'amélioration des infrastructures, en respectant les règles de sécurité, de qualité, de performance, etc.;
- **Les usagers** : Il s'agit des personnes, des communautés, des citoyens, des entreprises, des associations, des administrations, etc., qui bénéficient des services fournis par les infrastructures, en respectant les conditions d'utilisation, les tarifs, les règlements, etc.

plusieurs décennies, l'imminence des risques que les infrastructures encourent ou s'apprêtent à encourir s'en trouve rapprochée.

Or, si l'action est insuffisante et ne correspond ni à l'ampleur de l'urgence ni à son imminence, nous possédons néanmoins les budgets et ressources (s'ils sont mieux répartis), les connaissances théoriques et technologiques nécessaires, ainsi que les capacités d'innovation. Il ne manque plus que de la cohérence, de la coopération, de la volonté, ainsi qu'une gestion intégrée et efficace des solutions identifiées. Ce qui, sans conteste, est à notre portée.

Création de multiples systèmes d'action polyvalents : une approche proactive

Pour soutenir une réponse à plus petite échelle, tout en répondant aux nécessités de plus grandes échelles, nous avons besoin de systèmes de réponse globale et rapide axés sur l'action de manière comparable aux départements de pompiers, tels que les réseaux de premiers répondants expérimentés, qui agissent de manière structurée, efficace et décisive en cas de catastrophes, et qui peuvent agir rapidement pour fournir un soutien sur le terrain. Une analogie avec les systèmes de réponses des départements de pompiers fait de plus en plus son chemin dans divers domaines liés à des urgences. Elle constitue un exemple simple et connu qui aide à mieux se représenter une réponse efficace à des urgences.

En outre, pour une réponse efficace aux urgences qui menacent les infrastructures, il est nécessaire de mettre en place des options de financement flexibles, une utilisation efficiente des ressources disponibles, une main-d'œuvre polyvalente, ainsi qu'un système de communication clair et précis, qui renforce la confiance du public grâce à la diffusion d'information tangibles sur les risques et les solutions.

De plus, nous devons développer des programmes d'échange pour aider à partager les connaissances et les meilleures pratiques. Ces programmes favoriseraient la collaboration et la coordination entre les acteurs, tout en renforçant les capacités des partenaires locaux et globaux pour leur permettre de diriger la réponse climatique, incluant l'adaptation et l'atténuation. Les programmes d'échanges peuvent permettre de diriger cette réponse (voire l'action climatique, en facilitant le partage des connaissances et des expériences) entre les différents acteurs impliqués dans la lutte contre le changement climatique. En effet, ces programmes peuvent :

- Accroître la sensibilisation et la compréhension des enjeux et des solutions climatiques, en diffusant des informations scientifiques, techniques, économiques, sociales et culturelles pertinentes et adaptées aux contextes locaux et globaux;
- Renforcer les capacités et les compétences des acteurs, en leur offrant des opportunités de formation, d'accompagnement, de mentorat, de réseautage, etc., qui leur permettent de développer et

de mettre en œuvre des projets et des initiatives climatiques efficaces et innovants;

- Stimuler la collaboration et la coordination des acteurs, en créant des espaces de dialogue, de concertation, de coopération, de partenariat, etc., qui favorisent la synergie, la complémentarité et la mutualisation des ressources et des efforts entre les acteurs locaux et globaux;
- Intégrer une approche écosystémique, qui vise à gérer les ressources naturelles de manière durable et équitable, en tenant compte des interactions entre les êtres vivants et leur environnement.

Toutes ces applications permettent de développer des boucles de rétroaction et d'amélioration continue, qui renforcent notamment les mesures de réduction des risques de catastrophe.

Nous avons également besoin de systèmes logistiques et d'infrastructures qui peuvent être utilisés pour répondre rapidement et efficacement. Concevoir de tels systèmes logistiques et d'infrastructures plus résilients implique d'élaborer et de mettre en œuvre des mécanismes, des processus ou des sous-systèmes qui permettent d'identifier rapidement les ressources pertinentes disponibles à fournir au moment requis dans les zones affectées et les organisations répondantes. Cela implique aussi que ces mécanismes soient flexibles, afin de fournir ces ressources de manière adaptée et efficace dans un environnement en changement constant. De plus, nous devons créer des cadres stratégiques qui soutiennent la coordination mondiale des

efforts, en vue de développer des approches plus résilientes pour répondre aux catastrophes à plus petite échelle.

Une telle approche centrée sur l'action nécessite également de l'adaptabilité organisationnelle pour favoriser l'innovation sociale et technologique. Cette dernière va de la création de stratégies innovantes de prévention au déploiement rapide de nouvelles mesures d'adaptation ou de mitigation. Nous devons nourrir les capacités institutionnelles qui peuvent être rapidement mobilisées. Nous devons nous assurer que nos infrastructures sont résilientes, inclusives et équipées pour répondre aux besoins et soutenir les populations partout dans le monde. [30, 37 et 112]

Surtout, nous devons renforcer la capacité de mettre en place rapidement des infrastructures qui garantissent un accès universel à des mesures préventives. Plutôt que d'être simplement réactifs, comme c'est souvent le cas aujourd'hui, nous devons concevoir de manière proactive des chaînes d'approvisionnement, notamment en eau, en énergie et en ressources, pour une robustesse et une résilience accrues, et nous devons optimiser la logistique pour l'efficacité et favoriser un réseau rapide et précis pour le partage d'informations les concernant.

Dans la pratique, cela signifie que devraient être élaborés des éléments contractuels types concernant des aspects de long terme, incluant des dispositions pour accélérer la production dans les situations de crise; le tout étant à inclure dans des contrats conclus avec des fabricants ou

distributeurs de ressources et de fournitures essentielles. En outre, nous devons développer des protocoles pour le déploiement rapide des ressources et du personnel en réponse aux crises locales émergentes, minimisant ainsi le temps entre la détection d'une crise et la réponse. Ce faisant, nous pouvons mieux prévenir et gérer les futures crises.

Solutions créatives

Refermons la boucle en revenant à un registre plus global.

Pour arriver à contrer, ou à tout le moins à minimiser les impacts du dépassement des points de bascule imminents, ainsi que le changement climatique lui-même, nous devons sans doute compter sur un ensemble de solutions créatives.

Au rang de ces dernières figure le financement. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'il s'écoule normalement un certain temps avant qu'une mesure financière suscite un ajustement dans les systèmes de réponses ou les infrastructures, et encore davantage en ce qui touche la prévention de déclenchement de points de bascule ou d'atténuation de crises concomitantes. [31, 32, 33, 34, 35 et 36]

Voici des exemples de solutions créatives, d'ordre financier ou autre :

- a) **Tout d'abord, réduire considérablement les subventions de l'industrie des combustibles fossiles :** Les gouvernements peuvent commencer à appliquer une réforme des subventions [36]. Bien qu'il n'y ait pas de recette unique pour une réforme réussie des subventions, nous pouvons utiliser les [recommandations du FMI](#) [31] et la *Note de politique* de la Banque mondiale [46] pour suggérer les ingrédients suivants :
- Un plan global de réforme du secteur de l'énergie contenant des objectifs clairs à long terme ainsi qu'une analyse de l'impact des réformes;
 - Des augmentations de prix, qui sont mises en œuvre progressivement;
 - Des mesures visant à protéger les pauvres au moyen de transferts ciblés en espèces ou quasi monétaires ou, si cette option n'est pas possible, en mettant l'accent sur les programmes ciblés existants qui peuvent être élargis rapidement;
 - Des réformes institutionnelles qui dépolitisent la tarification d'énergie, comme l'introduction de mécanismes de tarification automatiques.
- b) **Utiliser l'intelligence artificielle :** Au niveau de l'apprentissage automatique ou au-delà, pour aider à prédire quand et où s'attendre à des événements météorologiques violents. La planification de la réduction comprend l'identification des principales

sources d'émissions et la mise en œuvre de mesures pour les réduire. Il s'agit d'un défi principalement dû à l'absence de mesures précises pour déterminer les émissions dérivées de certains processus. La technologie de l'IA relève ce défi en créant des bases de données à partir d'informations en temps réel pour mieux prédire les émissions des processus. En analysant et en apprenant à travers les données de plusieurs processus, l'IA peut affiner l'évaluation de la performance des mesures de réduction et optimiser les prévisions d'émissions. Au-delà de l'optimisation des stratégies de réduction des émissions de GES, cette technologie permet également d'abaisser les coûts marginaux globaux inhérents à la réduction de GES.

- c) **Recentrer les politiques d'utilisation des terres et les incitatifs pour une meilleure planification et gestion de l'utilisation des terres :** Un tel repositionnement implique des mesures telles que l'élimination des incitatifs problématiques, notamment ceux qui encouragent des pratiques nuisibles telles que le défrichement par le feu des terres forestières pour les remplacer par d'autres solutions. Voilà qui implique toutefois de clarifier les droits fonciers afin de réduire de façon concomitante l'utilisation négligente de l'eau et de la terre et de renforcer la coordination entre les secteurs afin de réduire les pratiques conflictuelles.
- d) **Investir à la fois dans l'atténuation et la prévention :** À l'échelle mondiale, les vagues de chaleur ou la gestion des feux de forêt sont souvent traitées comme une urgence plutôt que comme faisant partie de la gestion de

routine. Ce sont de bons exemples de secteurs où on pourrait mettre en œuvre des solutions s'inspirant de techniques existantes dans la gestion des services d'urgence : soit des pratiques et des outils éprouvés – tels que la surveillance et la détection précoce des incendies, l'évaluation des risques et la gestion de la vulnérabilité des actifs, comme les zones tampons et l'adoption de codes et de normes –; ces dispositifs devraient être mis à l'échelle, c'est-à-dire faire l'objet d'adaptations, puisqu'il s'agit de solutions non encore déployées à grande échelle. Concernant les incendies de forêt, les gouvernements devront donc trouver un équilibre entre les investissements dévolus à la suppression des incendies de forêt et des mesures visant à les prévenir, telles que la réduction des charges de combustible, la restauration des écosystèmes aux modèles d'incendies naturels et l'éducation des utilisateurs des incendies (voir [McFayden et al. 2023](#)) [21]. Du côté des vagues de chaleur, les gouvernements doivent réduire l'effet d'îlot dans les villes en améliorant le déploiement urbain et en promouvant des pratiques durables dans la gestion des terres.

- e) **Améliorer la collecte et l'analyse des données :** La collecte et l'analyse des données sont nécessaires pour mieux comprendre quelles en sont les causes et pour cerner les lacunes dans les capacités de prévention et d'intervention. Grâce à de bonnes données, les gouvernements peuvent examiner les pratiques de gestion pour déterminer ce qui fonctionne ou ne fonctionne pas. Puisqu'il existe une myriade de bases de données et de systèmes impliqués dans différents actifs

producteurs de carbone, la main-d'œuvre nécessaire pour simplement catégoriser et organiser les données de plusieurs milieux (publics et privés) et d'actifs est immense. L'intégration de l'IA et de l'IoT (Internet of Things) permet un approvisionnement transparent en données en temps réel et en données d'inventaire des actifs à partir d'une variété de systèmes. Ainsi, une organisation se voit dotée d'une capacité de structurer, de collecter et de transformer efficacement les données en rapports pour une surveillance et une mesure précise des GES, réduisant ainsi les efforts globaux de collecte de données et de reddition de compte et améliorant la qualité des données et la résolution des rapports. [26]

- f) **Renforcer la coordination et la préparation des intervenants :** La gestion et les interventions font interagir de nombreux intervenants, y compris les collectivités locales, les divers ordres de gouvernement, le secteur privé et les organisations de la société civile. La participation de toutes les parties prenantes à la planification aide à établir des fonctions, des tâches et des responsabilités claires pour permettre une coordination efficace.

- g) **Changer les comportements :** Une [étude](#) publiée en 2023 [33] montre que les secteurs du transport durable, de la conservation des ressources et de la consommation circulaire possèdent un bon potentiel d'atténuation du changement climatique. Toutefois, il est important de faire progresser les connaissances actuelles en effectuant une synthèse des interventions visant à

promouvoir les comportements d'atténuation du changement climatique sur le terrain. [33, 112]

- h) **Encourager les énergies renouvelables** : Les énergies renouvelables, en particulier dans le cadre d'une approche axée sur les ressources énergétiques distribuées (DER),⁵¹ peuvent contribuer de manière significative à l'adaptation au changement climatique et à créer des possibilités de pratiques novatrices pour lutter contre le changement climatique. Les solutions d'adaptation basées sur les énergies renouvelables intégrant le stockage d'énergie favorisent l'atténuation et renforcent les efforts d'adaptation de manière synchrone dans de nombreux secteurs. En tant que ressources énergétiques polyvalentes, les énergies renouvelables peuvent répondre à un large éventail de besoins d'adaptation et offrir des avantages que d'autres ressources ne peuvent pas fournir. Les solutions d'énergie renouvelable distribuée (technologies qui fournissent de l'énergie en dehors d'un réseau central)

⁵¹ L'approche axée sur les ressources énergétiques distribuées (DER) consiste à utiliser des technologies à petite échelle, de production, de stockage ou de gestion de l'électricité, qui sont connectées au réseau électrique ou qui fonctionnent de manière autonome. Cette approche permet de diversifier les sources d'énergie, de réduire les pertes de transport, de renforcer la résilience du réseau, de favoriser l'autoconsommation et la participation des consommateurs et ainsi, de contribuer à la transition énergétique. Les DER peuvent inclure des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries, des véhicules électriques, des systèmes de chauffage et de refroidissement, des dispositifs de réponse à la demande, etc. Les DER peuvent être gérées de manière centralisée ou décentralisée en fonction des besoins et des opportunités du système électrique.

peuvent créer un système énergétique résilient, et donc soutenir des mesures d'adaptation vitales pour les communautés les plus vulnérables. [26, 34 et 35]

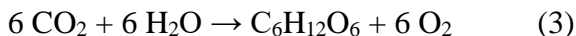
- i) **Utiliser de l'énergie libre de Gibbs dans une approche holistique pour minimiser les impacts climatiques :** Cette approche implique la compréhension de la photosynthèse et de son rôle dans le cycle du carbone.⁵² La photosynthèse est un processus important pour la vie sur Terre, car elle fournit de l'oxygène et de la nourriture pour les organismes vivants. Elle est également importante pour le cycle du carbone, car elle absorbe le dioxyde de carbone de l'atmosphère et le transforme en glucose. Le glucose est ensuite utilisé pour produire de l'énergie et pour construire des molécules organiques.

L'énergie libre de Gibbs est une grandeur thermodynamique qui mesure le potentiel de travail réversible ou maximum qui peut être effectué par un système à température et pression constantes. Elle dépend de l'enthalpie, qui est la quantité de chaleur échangée par le

⁵² L'énergie libre de Gibbs est une mesure de l'énergie disponible pour effectuer un travail utile dans un système chimique. Dans le cas de la photosynthèse, l'énergie libre de Gibbs est utilisée pour mesurer la quantité d'énergie disponible pour la synthèse de glucose à partir de CO₂ et d'eau. La photosynthèse est un processus complexe qui se produit chez les plantes, les algues et certaines bactéries. Elle convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique, qui y est stockée sous forme de glucose. La photosynthèse est un processus important pour la vie sur Terre, car elle fournit de l'oxygène et de la nourriture pour les organismes vivants.

système, et de l'entropie, qui est la mesure du désordre du système.

En utilisant l'énergie libre de Gibbs pour mesurer la quantité d'énergie disponible pour la synthèse de glucose, nous pouvons comprendre comment la photosynthèse peut être utilisée pour minimiser les impacts climatiques.⁵³ En effet, la réaction de photosynthèse peut s'écrire sous la forme suivante :



L'énergie libre de Gibbs standard de cette réaction est égale à :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (4)$$

où ΔH° est la variation d'enthalpie standard, T est la température absolue et ΔS° est la variation d'entropie standard. Les valeurs de ces grandeurs pour la réaction de photosynthèse sont les suivantes :

⁵³ L'énergie libre de Gibbs est importante pour la photosynthèse, car elle mesure la quantité d'énergie disponible pour la synthèse de glucose. La photosynthèse est un processus endothermique, ce qui signifie qu'elle nécessite de l'énergie pour se produire. L'énergie lumineuse est utilisée pour exciter les électrons dans les molécules de chlorophylle, lesquelles sont ensuite utilisées pour produire de l'ATP et du NADPH. L'ATP et le NADPH sont utilisés pour produire du glucose à partir de CO_2 et d'eau. La quantité d'énergie disponible pour la synthèse de glucose dépend de la quantité d'énergie lumineuse absorbée par les molécules de chlorophylle et de la quantité d'ATP et de NADPH produits par la photosynthèse.

$$\Delta H^\circ = -2803 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta S^\circ = -477 \text{ J/mol.K } T = 298 \text{ K}$$

En intégrant les valeurs de ΔH° et ΔS° dans la formule de Gibbs, on obtient :

$$\Delta G^\circ = -2803 - 298 \times (-477/1000)$$

$$\Delta G^\circ = -137 \text{ kJ/mol}$$

Ce résultat signifie que la réaction de photosynthèse est spontanée et exergonique, c'est-à-dire qu'elle libère de l'énergie libre. Cette énergie libre peut être utilisée par les organismes photosynthétiques pour réaliser d'autres processus vitaux, comme leur croissance, leur reproduction ou leur réaction de défense. Elle peut aussi être transférée à d'autres organismes par les chaînes alimentaires, et ainsi soutenir la biodiversité et les services écosystémiques.

- j) **Appliquer le biomimétisme à plus grande échelle :** La photosynthèse en est un exemple. Elle compte au rang des phénomènes fondamentaux qui sont importants dans le cadre d'une approche holistique. Il s'agit de considérer la photosynthèse en tant que telle, ainsi que son rôle dans le cycle du carbone. La photosynthèse est le processus par lequel les plantes, les algues et certaines bactéries utilisent l'énergie solaire pour synthétiser des molécules organiques, comme le glucose, à partir de l'eau et du dioxyde de carbone. Ce faisant, ces molécules libèrent de l'oxygène et stockent du carbone sous forme réduite. La photosynthèse contribue ainsi à réguler la

concentration de GES dans l'atmosphère, et à maintenir la vie sur Terre.

L'exploitation de la photosynthèse peut donc être considérée comme une source d'énergie renouvelable et durable, qui permet de réduire les émissions de GES et de favoriser la résilience des écosystèmes face au changement climatique. Notamment, elle peut inspirer des innovations imitant l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie utile, comme le permet la photosynthèse, un processus développé et optimisé par la nature sur des millions d'années. Ce qui correspond à un exemple de biomimétisme. Or, de manière comparable, plusieurs autres solutions peuvent imiter la nature et ses multiples possibilités. Une approche holistique cultivant des solutions créatives pour minimiser les impacts climatiques implique de valoriser la photosynthèse et de protéger les organismes qui la réalisent. Nous pouvons également utiliser cette approche pour développer des pratiques agricoles durables qui privilégient la photosynthèse et la séquestration du carbone dans le sol.

	Solutions créatives, innovantes et durables	Déploiement	
		Immédiat	À long terme
1	Tout d'abord, réduire considérablement les subventions de l'industrie des combustibles fossiles.	X	
2	Utiliser l'intelligence artificielle	X	X
3	Recentrer les politiques d'utilisation des terres et les incitatifs pour une meilleure planification et gestion de l'utilisation des terres.	X	
4	Investir à la fois dans l'atténuation et la prévention.	X	X
5	Améliorer la collecte et l'analyse des données.	X	
6	Renforcer la coordination et la préparation des intervenants.	X	
7	Changer les comportements.		X
8	Encourager les énergies renouvelables.	X	X
9	Utiliser de l'énergie libre de Gibbs dans une approche holistique pour minimiser les impacts climatiques.		X
10	Appliquer le biomimétisme à plus grande échelle.		X

Tableau 2 – Solutions créatives, innovantes et durables.

Le tableau 2 présente une synthèse des solutions créatives, innovantes et durables proposées précédemment, à titre indicatif. Ces indications générales suffisent à mettre en lumière le potentiel innovateur pouvant émerger de solutions créatives. En travaillant ensemble pour promouvoir des pratiques durables et pour minimiser les impacts climatiques, nous pouvons protéger notre planète et garantir un avenir durable aux générations futures.

Bien que de telles solutions créatives puissent être moins reconnues et moins médiatisées que les projets de séquestration du carbone (souvent très coûteux et peu efficaces) ou que des mesures d'urgence (qui sont importantes, certes, mais relativement à des événements uniques qui ne peuvent permettre de modifier la trajectoire nuisible actuelle). De telles solutions créatives vont plus loin, parce qu'elles se soucient de prévention, qu'elles s'avèrent plus innovatrices, par exemple en imitant la nature, et qu'elles modifient les pratiques et les comportements... De telles manières de procéder sont essentielles si nous voulons réduire les coûts sociaux, économiques et écologiques des phénomènes extrêmes et atteindre les objectifs de développement durable, notamment ceux de l'Accord de Paris sur le changement climatique et du cadre de biodiversité pour l'après-2020.

Voilà qui met en lumière que nous devons valoriser davantage les éléments qui sont importants pour nous, comme la nature, la santé, la justice ou la paix, et que nous devons agir en conséquence pour les protéger et les renforcer. Cette mise en relief souligne aussi l'urgence de la situation climatique, qui nécessite une action rapide et

ambitieuse pour éviter des impacts irréversibles et catastrophiques globaux, c'est-à-dire sur l'humanité et la planète.

La situation climatique est fort complexe. Beaucoup plus d'aspects que ceux présentement considérés doivent l'être pour que nos interventions soient à la hauteur et deviennent alors efficaces.

Il faut donc élaborer et parvenir à déployer des systèmes d'alerte précoces calibrés en fonction des CTP, ces oubliés de la gestion des risques de l'urgence climatique. L'alerte précoce de CTP imminents est possible en principe; elle pourrait réduire considérablement les risques inhérents à leur déclenchement, en permettant d'anticiper et d'atténuer les impacts des changements irréversibles. Plusieurs travaux récents ont proposé des méthodes et des indicateurs pour détecter les signes avant-coureurs d'un point de bascule, en utilisant des données observationnelles, des modèles climatiques ou des analyses statistiques.

Par exemple, une étude publiée en 2020 a identifié des indicateurs de criticité basés sur la variabilité de la température, de la pression et de la vitesse du vent, qui pourraient signaler l'approche d'un CTP dans la circulation atmosphérique de l'hémisphère Nord [72]. Une autre étude publiée en 2021 a développé un indice de risque de basculement basé sur la distance entre l'état actuel du système et le seuil critique, qui pourrait être utilisé pour surveiller l'évolution des CTP et évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation [73]. D'autres études publiées en 2021 [74-76] ont proposé une méthode pour détecter les transitions abruptes dans les séries temporelles climatiques,

en utilisant des techniques de décomposition et de reconstruction des signaux, qui pourrait être appliquée à la détection du franchissement de différents CTP potentiels.

L'urgence climatique implique que nous ne tardions pas pour commencer à agir adéquatement, car les conséquences de l'inaction ne feront que s'accroître avec le temps. En effet, plus nous attendons pour réduire les émissions de GES, plus il sera difficile et coûteux d'atteindre l'objectif de limiter le réchauffement de sorte à respecter la cible fixée dans l'Accord de Paris de 2015. Selon le dernier rapport du GIEC, il faudrait réduire les émissions mondiales de 45 % d'ici 2030 et atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 pour avoir une chance de respecter cet objectif.

Pour agir face à l'urgence climatique, il importe donc d'adopter une approche holistique, créative et transversale, qui implique tous les niveaux de gouvernance, tous les secteurs d'activité, toutes les parties prenantes et tous les citoyens. C'est peut-être la seule avenue qui soit adaptée à la complexité des défis climatiques. Il faut également mettre en œuvre des mesures efficaces d'atténuation (qui visent à réduire les émissions de GES) et d'adaptation (qui visent à réduire la vulnérabilité aux impacts du changement climatique). Il faut enfin promouvoir la justice climatique, qui vise à réduire les inégalités et à garantir les droits humains face aux conséquences du réchauffement. Un monde où les problèmes de cet ordre sont suffisamment pris en charge laissera plus de temps disponible focalisé sur la lutte climatique.

La situation climatique actuelle nous invite à prendre conscience de la valeur des choses que nous apprécions, de

la gravité de la situation climatique et de la nécessité d'agir sans tarder pour préserver un avenir viable pour tous. L'urgence implique que nous ne tardions pas à commencer à agir, car les conséquences de l'inaction ne feront que s'accroître avec le temps.

CONCLUSION

Ce document a souligné que le changement climatique d'origine humaine provoque le franchissement de plusieurs points de bascule, y compris la fonte irréversible de l'inlandsis du Groenland, le dépérissement de la forêt amazonienne et le déplacement de la mousson ouest-africaine. Des évaluations récentes augmentent la probabilité de futurs bouleversements, et on estime que les impacts correspondants sont importants, ce qui en fait des risques préoccupants. Comme on l'a vu, des travaux récents montrent que l'alerte précoce d'un CTP imminent est possible, en principe, et qu'un plan d'intervention qui les prend en compte pourrait réduire considérablement autant leurs risques de se produire que leurs conséquences.

Des études ont montré que plusieurs autres points de bascule peuvent être déclenchés même si la plage de l'Accord de Paris de 1,5 °C à 2 °C de réchauffement climatique est respectée. En outre, beaucoup d'autres seraient probablement franchis à l'atteinte d'un réchauffement de 2 °C à 3 °C, soit celui que prévoient les trajectoires politiques actuelles.

Des études ont conclu que, dans le système climatique de la Terre, plusieurs points de bascule mondiaux et régionaux sont imminents. Rappelons qu'au-delà de leur basculement des changements irréversibles et potentiellement catastrophiques peuvent se produire.

Plusieurs des travaux analysés pour cet essai synthétisaient des études paléoclimatiques, observationnelles ou basées sur des modèles. L'ensemble de l'analyse a fourni une liste restreinte de CTP, de points de bascule non climatiques et de limites terrestres; dont les seuils de température sont à surveiller, étant donné leur imminence.

Pour faire face à ces points de bascule, il est essentiel de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation, des pratiques agricoles durables, des efforts de conservation de l'eau et des politiques publiques visant à réduire les émissions de GES.

Les conséquences du franchissement d'un point de bascule dépendent du type et de l'ampleur des dérèglements dans le système climatique. Voici une liste de répercussions générales potentielles :

- Un réchauffement climatique accru en raison de boucles de rétroaction positives, telles que la libération de GES provenant de la fonte du pergélisol ou des forêts mourantes;
- Une élévation du niveau de la mer en raison de l'effondrement des calottes glaciaires, qui pourrait inonder les zones côtières et les îles, déplacer des millions de personnes et endommager les infrastructures;
- Une perte de biodiversité et de services écosystémiques due au dépérissement des forêts, des récifs coralliens et d'autres habitats, ce qui pourrait

affecter la sécurité alimentaire, la qualité de l'eau et la santé humaine;

- Des perturbations dans les régimes météorologiques et la circulation océanique en raison du ralentissement ou de l'arrêt des courants, tels que l'AMOC, qui pourraient affecter le climat régional et mondial, les précipitations, les sécheresses, les tempêtes et la vie marine.

Les récentes températures extrêmes records, les feux de forêt et la fonte de la glace ou du pergélisol de 2023 ont exercé une pression immense sur les réseaux électriques, mis en péril l'approvisionnement en eau et causé des dommages aux routes.

Les climatologues mettent en garde depuis des décennies contre les effets néfastes des phénomènes météorologiques extrêmes dus aux activités humaines, et il semble qu'ils se produisent plus fréquemment et avec une plus grande intensité que nous l'estimions, en plus de nous rapprocher de l'atteinte de points de bascule.

Les systèmes d'infrastructure qui soutiennent le développement mondial n'ont pas été construits pour résister à des phénomènes climatiques aussi extrêmes. À la fin de 2023, les investissements réalisés dans ces systèmes étaient encore insuffisants pour apporter une différence significative.

Le monde doit anticiper et se préparer aux impacts qui ont déjà commencé à se produire et qui poursuivent leur

course dans le monde, afin que nous puissions les affronter le plus tôt possible et efficacement pour réduire leurs conséquences ou même arrêter ou ralentir leurs pires conséquences, qui vont en s'accélégrant ou en s'amplifiant. Les interventions requises vont nécessiter des investissements substantiels en ressources, ainsi qu'un engagement à trouver des solutions durables.

Nous devons compter sur des solutions créatives, tandis que le financement prend du temps pour s'adapter aux prochaines traversées de points de bascule et aux crises qui y sont associées.

Les scientifiques se sont penchés sur les premiers CTP approchant déjà de leurs seuils de déclenchement respectifs. Certains de ceux-ci, ont-ils également démontré, seraient traversés plus tôt que prévu. C'est que les CTP, comme le changement climatique, sont engagés sur des voies d'accélération qui pourraient amplifier leurs impacts et augmenter leur probabilité d'être déclenchés, et ce, en peu de temps. Malgré tout, si nous agissons rapidement et de manière décisive, autant leurs impacts que leur probabilité pourraient être réduits au point d'assurer un niveau suffisant de bien-être et de sécurité globale.

La réduction des subventions aux combustibles fossiles, la promotion des énergies renouvelables, en particulier dans l'intégration du stockage d'énergie par les ressources énergétiques distribuées (DER), l'exploitation de la force de l'intelligence artificielle dans la prévision et l'analyse ou le biomimétisme peuvent constituer des opportunités pour des

pratiques innovantes en matière de lutte contre le changement climatique.

Ainsi, ces solutions pourront contribuer de manière significative à l'adaptation et à l'atténuation rapides du changement climatique. Bien que de telles mesures de prévention sortant des sentiers battus puissent être moins reconnues et médiatisées que les efforts d'urgence conventionnels ne le sont, elles deviennent essentielles si nous voulons réduire les coûts sociaux, économiques et écologiques des conditions météorologiques extrêmes ou des conséquences du franchissement des points de bascule en voie de dépassement.

Qui sait? En fournissant un effort important et des solutions créatives, il sera peut-être possible de se rapprocher des objectifs de développement durable de l'Accord de Paris sur le changement climatique et du cadre de biodiversité post-2020.

Entre temps, l'évaluation des risques liés aux CTP est un autre élément important, qui implique l'identification des dangers et des facteurs de risque associés à chaque point de bascule, l'analyse et l'examen du risque associé à chacun, sans oublier la détermination des moyens appropriés pour éliminer le danger ou pour maîtriser le risque lorsque le danger ne peut pas être éliminé. L'évaluation des risques peut également être utilisée pour déterminer les mesures à prendre pour réduire les risques et pour protéger les personnes et les biens.

En définitive, le degré de réchauffement n'est pas l'unique critère à considérer en ce qui touche l'urgence climatique, car il masque la complexité et la diversité des impacts du changement climatique sur les différents systèmes naturels et humains. Il faut donc prendre en compte d'autres indicateurs, comme les émissions de GES, les scénarios socio-économiques, les trajectoires d'adaptation et d'atténuation, les coûts et les bénéfices, les risques et les incertitudes, ainsi que l'éthique et les valeurs, dans le but d'évaluer adéquatement l'urgence climatique et d'y répondre de manière efficace et équitable.

Une approche holistique pour minimiser les impacts climatiques implique la compréhension de phénomènes fondamentaux (comme la photosynthèse et son rôle dans le cycle du carbone), les lois de la thermodynamique, ainsi que l'importance de la réduction des émissions de GES et de la promotion de pratiques durables.

L'urgence est donc sur nous. C'est pourquoi il importe de commencer à agir adéquatement et efficacement, sans quoi les conséquences de l'inaction ne feront que s'accroître avec le temps. Les nouveaux champs d'action qui s'ouvrent ainsi devaient par ailleurs inspirer autant de domaines de recherches futures destinés à éclairer et à mieux nous préparer aux implications plus larges que d'abord estimé et à la mesure des répercussions qui sévissent déjà dans le monde.

Désormais forts de l'idée que prévoir l'urgence de demain est un impératif immédiat, mettons-nous efficacement au travail, mobilisant des pratiques à la hauteur des défis actuels.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à souligner la collaboration indéfectible des équipes de Smart Phases (SPI) et du Groupe de recherche STIM-CS (Climat Santé), pour leur soutien technique depuis le début, sans oublier Chantal Demers, pour son assistance avisé et essentiel à la révision linguistique d'un tel ouvrage.

RÉFÉRENCES

1. DITLEVSEN, Peter et Susanne Ditlevsen (25 juillet 2023). « Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation », *Nature Communications*, 14, 4254, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
2. LENTON, Timothy M., Johan ROCKSTRÖM, Owen GAFFNEY, Stefan RAHMSTORF, Katherine RICHARDSON, Will STEFFEN et Hans Joachim SCHELLNHUBER (27 novembre 2019). « Climate tipping points too risky to bet against », *Nature*, 575, 28, <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0>.
3. THOMPSON, Lauren M., McKenzie A. KUHN, Johanna C. WINDER, Lucas P. P. BRAGA, Ryan H. S. HUTCHINS, Andrew J. TANENTZAP, Vincent L. ST. LOUIS et David OLEFELDT (18 janvier 2023). « Controls on methylmercury concentrations in lakes and streams of peatland-rich catchments along a 1700 km permafrost gradient », *Limnology and Oceanography*, 68,3, 583-597, <https://doi.org/10.1002/lno.12296>.
4. RIEKE, Ole, Marius ÅRTHUN et Jakob Simon DÖRR (4 avril 2023) « Rapid sea ice changes in the future Barents Sea », *The Cryosphere*, 17, 4, 1445-1456, <https://doi.org/10.5194/tc-17-1445-2023>.

5. David I. ARMSTRONG MCKAY, Arie STAAL, Jesse F. ABRAMS, Ricarda WINKELMANN, Boris SAKSCHEWSKI, Sina LORIANI, Ingo FETZER, Sarah CORNELL, Johan ROCKSTRÖM, et Timothy M. LENTON (9 septembre 2022). « Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points », *Science*, 377, 6611, eabn7950, DOI:10.1126/science.abn7950, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn7950>.
6. CAILLET, Justine, Nicolas C. JOURDAIN, Pierre MATHIOT, Hartmut H. HELLMER et Jérémie MOUGINOT (20 décembre 2022). « Drivers and Reversibility of Abrupt Ocean State Transitions in the Amundsen Sea, Antarctica », *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, 1, e2022JC018929, <https://doi.org/10.1029/2022JC018929>.
7. GIEC (20 mars 2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Contribution des groupes de travail I, II et III, sixième rapport, Suisse, 81 p., https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.
8. CLIMATE ANALYTICS et NEWCLIMATE INSTITUTE (Novembre 2022). *Climate Action Tracker-Warming Projections Global Update*, https://climateactiontracker.org/documents/1094/CAT_2022-11-10_GlobalUpdate_COP27.pdf.
9. PILIPOVIC, Predrag, Adeline SAMSON et Susanne DITLEVSEN (21 novembre 2022). « Parameter Estimation in Nonlinear Multivariate Stochastic Differential Equations Based on Splitting Schemes », *Arxiv*, arXiv, 2211.11884, <https://arxiv.org/abs/2211.11884v1>.

10. SIMPKINS, Graham (2 mai 2023). « Rapid ice change events in the Barents Sea », *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 297, <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00437-6>.
11. LIU, T., D. CHEN, L. YANG, et coll. (Janvier 2023). « Teleconnections among tipping elements in the Earth system. », *Nature Climate Change*, 13, 67–74, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01558-4>.
12. LENTON, Timothy M. (2011). « Early warning of climate tipping point », *Nature Climate Change*, 1, 201-209, <https://doi.org/10.1038/nclimate1143>.
13. LENTON, Timothy M., Hermann HELD, Elmar KRIEGLER, Jim W. HALL, Wolfgang LUCHT, Stefan RAHMSTORF, Hans Joachim SCHELLNHUBER (7 février 2008). « Tipping elements in the Earth's climate system », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 6, 1786-1793, DOI:10.1073/pnas.0705414105, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18258748/>.
14. BÖNING, C.W., P. WAGNER, P. HANDMANN, F. U. SCHWARZKOPF. K. GETZLAFF ET a. BIASTOCH (2023). « Decadal changes in Atlantic overturning due to the excessive 1990s Labrador Sea convection », *Nature Communications*, 14, 4635, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40323-9>.
15. BARBA, Diego (3 mai 2022). « Stochastic Processus simulation–The Ornstein Uhlenbeck Process », *Medium, Towards Data Science*, <https://towardsdatascience.com/stochastic-processes-simulation-the-ornstein-uhlenbeck-process-e8bff820f3>.

16. RAHMSTORF, Stefan (2002). « Ocean circulation and climate during the past 120,000 years », *Nature*, 419, 207-214, <https://doi.org/10.1038/nature01090>.
17. STARKO, Samuel, James E. FIFER, Danielle C. CLAAR, Sarah W. DAVIES, Ross CUNNING, Andrew C. BAKER et Julia BAUM (11 août 2023). « Marine heatwaves threaten cryptic coral diversity and erode associations among coevolving partner », *Science Advances*, 9, 32, eadf0954, DOI:10.1126/sciadv.adf0954, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adf0954>.
18. Terry P. Hughes, Kristen D. ANDERSON, Sean R. CONNOLLY, Scott F. HERON, James T. KERRY, Janice M. LOUGH, Andrew H. BAIRD, Julia K. BAUM, Michael L. BERUMEN, Tom C. BRIDGE, Danielle C. CLAAR, C. Mark EAKIN, James P. GILMOUR, Nicholas A. J. GRAHAM, Hugo HARRISON, Jean-Paul A. HOBBS, Andrew S. HOEY, Mia HOOGENBOOM, Ryan J. LOWE, Malcolm T. MCCULLOCH, John M. PANDOLFI, Morgan PRATCHETT, Verena SCHOEPF, Gergely TORDA et Shaun K. WILSON (5 janvier 2018). « Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene », *Science*, 359, 6371, 80-83, DOI:10.1126/science.aan8048, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aan8048>.
19. BIESER, Johannes, David J. AMPTMEIJER, Ute DAEWEL, Joachim KUSS, Anne L. SOERENSEN et Corinna SCHRUM (17 mai 2023). « The 3D biogeochemical marine mercury cycling model MERCY v2.0 – linking atmospheric Hg to methylmercury in fish », *Geoscientific Model Development*, 16, 9, 2649-2688, DOI:10.5194/gmd-16-2649-2023, <https://gmd.copernicus.org/articles/16/2649/2023/>.

20. LANGER, Moritz, Thomas SCHNEIDER VON DEIMLING, Sebastian WESTERMANN, Rebecca ROLPH, Ralph RUTTE, Sofia ANTONOVA, Volker RACHOLD, Michael SCHULTZ, Alexander OEHME et Guido GROSSE (28 mars 2023). « Thawing permafrost poses environmental threat to thousands of sites with legacy industrial contamination », *Nature Communications*, 14, 1721, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37276-4>.

21. MCFAYDEN, Colin B., Emily S, HOPE, Den BOYCHUK, Lynn M. JOHNSTON, Ashlin RICHARDSON, Matthew COYLE, Meghan SLOANE, Alan S. CANTIN, Joshua M. JOHNSTON et Timothy J. LYNHAM (16 février 2023). « Canadian Fire Management Agency Readiness for WildFireSat: Assessment and Strategies for Enhanced Preparedness », *Incendie*, 6, 2, 73, <https://doi.org/10.3390/fire6020073>.

22. DRYDEN, Howard et Diane DUNCAN (2022). « Climate Disruption Caused by a Decline in Marine Biodiversity and Pollution », *International Journal of Environment and Climate Change*, 12, 11, 3413-3435, <https://doi.org/10.9734/ijecce/2022/v12i111392>.

23. ONU (6 mai 2019). « Nature's Dangerous Decline "Unprecedented" Species Extinction Rates "Accelerating" », Communiqué de presse, Genève, <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/natures-dangerous-decline-unprecedented-species-extinction-rates>.

24. DRYDEN, Howard et Diane DUNCAN (17 juin 2021). « Climate regulating ocean plants and animals are being destroyed by toxic chemicals and plastics, accelerating our path towards ocean pH 7,95 in 25 years which will devastate humanity », *Environmental Science eJournal*, 1, 28, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3860950>.

25. ONU (14 juin 2023). *The 2023 Global Sustainable Development Report. Times of Crisis, Times of Change, Science for Accelerating Transformations to Sustainable Development*, Department of Economic and Social Affairs, New York, 224 p., https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-09/FINAL%20GSDR%202023-Digital%20-110923_1.pdf.
26. BILODEAU, Stéphane (14 mai 2022). « Can AI and ML to save the clean transition acceleration or just keep the lights on during the storms? », *Medium, Towards Data Science*, <https://towardsdatascience.com/ai-and-ml-to-save-the-clean-transition-acceleration-or-just-to-keep-the-light-on-during-the-storms-9219b52a8fba>.
27. CARTY, Michael L. et Stéphane BILODEAU (30 mai 2023). « Benchmarking Thermodynamic Models for Optimization of PSA Oxygen Generators », *Multidisciplinary Scientific Journal*, 6, 2, 318-341, <https://doi.org/10.3390/j6020023>.
28. MAYER, Kathryn J., Xiaofei WANG, Mitchell V. SANTANDER, Brock A. MITTS, Jonathan S. SAUER, Camille M. SULTANA, Christopher D. CAPPÀ et Kimberly A. PRATHER (23 décembre 2020). « Secondary Marine Aerosol Plays a Dominant Role over Primary Sea Spray Aerosol in Cloud Formation », *ACS Central Science*, 6, 12, 2259-2266, DOI:10.1021/acscentsci.0c00793, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7760463/>.
29. MA, Fangfang, Hong-Bin XIE, Rongjie ZHANG, Lihao SU, Qi JIANG, Weihao TANG, Jingwen CHEN, Morten ENGSVANG, Jonas ELM et Xu-Cheng HE (21 avril 2023). « Enhancement of Atmospheric Nucleation Precursors on Iodic Acid-Induced Nucleation: Predictive Model and Mechanism », *Environmental Science & Technology*, 57, 17, 6944-6954, DOI:10.1021/acs.est.3c01034, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c01034>.

30. MATTI, T. J. Heino, Stéphane BILODEAU, Yaneer BARYAM, Carlos GERSHENSON, Sunil RAINA, Andrew EWING et Luis Eugenio DE SOUZA (12 juin 2023). « Building Capacity for Action: The Cornerstone of Pandemic Response », *WHN Science Communications*, 4, 6, 1-1, DOI: <https://doi.org/10.59454/whn-2306-015>.
31. BARRETT, Philip et Euihyun BAE (Août 2023). *Reported Social Unrest Index: May 2023 Update*, *International Monetary fund*, IMF Working Paper, 8 p., <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/WP/2023/English/wpiea2023168-print-pdf.ashx>.
32. KEMPER, Karin et al. (Mars 2020). *World Bank Policy Note: Managing Wildfires in a Changing Climate*, World Bank Group, ProFor Innovation and Action for Forests, 34 p. <https://www.profor.info/content/managing-wildfires-changing-climate>.
33. BERGQUIST, Magnus, Maximilian THIEL, Matthew H. GOLDBERG et Sander VAN DER LINDEN (21 mars 2023). « Field interventions for climate change mitigation behaviors: A second-order meta-analysis », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, 13, e2214851120, DOI:10.1073/pnas.2214851120, <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2214851120>.
34. IRENA (Août 2021). *Bracing for climate impact: Renewables as a climate change adaptation strategy*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <https://www.irena.org/publications/2021/Aug/Bracing-for-climate-impact-2021>.

35. IRENA (Juin 2023). *Innovation landscape for smart electrification: Decarbonising end-use sectors with renewable power*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,
<https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification>.

36. BOER, Lukas, Mr. Andrea PESCATORI et Martin STUERMER (4 août 2023). *Not All Energy Transitions Are Alike: Disentangling the Effects of Demand and Supply-Side Policies on Future Oil Prices*, International Monetary Fund, Series: IMF Working Papers, 2023, 160, 69 p., ISBN : 9798400249242, ISSN : 1018-5941,
<https://doi.org/10.5089/9798400249242.001>.

37. HEINO, Matti T. J., Stephane BILODEAU, Greta FOX, Carlos GERSHENSON et Yaneer BAR-YAM (11 octobre 2023). « Crafting Policies for an Interconnected World », *WHN Science Communications*, 4, 10,
<https://whn.global/scientific/crafting-policies-for-an-interconnected-world/>.

38. WERNBERG, Thomas, Mads S. THOMSEN, Julia K. BAUM, Melanie J. BISHOP, John F. BRUNO, Melinda A. COLEMAN, Karen FILBEE-DEXTER, Karine GAGNON, Qiang HE, Daniel MURDIYARSO, Kerrylee ROGERS, Brian R. SILLIMAN, Dan A. SMALE, Samuel STARKO et Mathew A. VANDERKLIFT (8 septembre 2023). « Impacts of Climate Change on Marine Foundation Species », *Annual Review of Marine Science*, 16, 247-282,
 DOI:10.1146/annurev-marine-042023-093037,
<https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-marine-042023-093037>.

39. THACKER, S., D. ADSHEAD, C. FANTINI, R. PALMER, R. GHOSAL, T. ADEOTI, G. MORGAN et S. STRATTON-SHORT (2021). *Les infrastructures et la lutte contre les changements climatiques*, UNOPS, Copenhague, Danemark, 41 p., https://content.unops.org/publications/Infrastructure-for-climate-action_FR.pdf.
40. IEA (2023). *Fossil Fuels Consumption Subsidies 2022*, Paris, <https://www.iea.org/reports/fossil-fuels-consumption-subsidies-2022>.
41. UNCC (s. d.) « L'Accord de Paris. Qu'est-ce que l'Accord de Paris? », <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris> (Consulté le 15 décembre 2023).
42. OCDE (2 décembre 2022). *Points de basculement climatique : Perspectives pour une action politique efficace*, Direction de l'environnement de l'OCDE, 5 p., <https://issuu.com/oecd.publishing/docs/resume-et-synthese-rapport-points-de-basculement-c>.
43. LEAHY, Stephen (s. d.). « Le changement climatique précipite la planète vers un dangereux point de non-retour », *National Geographic*, <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/2019/12/le-changement-climatique-precipite-la-planete-vers-un-dangereux-point-de-non> (Consulté le 15 décembre 2023).
44. UNCC (13 décembre 2023). « L'accord de la COP28 marque le "début de la fin" de l'ère des combustibles fossiles », Communiqué ONU Changements Climatiques, <https://unfccc.int/fr/news/l-accord-de-la-cop28-marque-le-debut-de-la-fin-de-l-ere-des-combustibles-fossiles>.

45. ENCYCLOPEADIA UNIVERSALIS (2023). « Changement anthropique du climat », <https://www.universalis.fr/encyclopedie/changement-anthropique-du-climat/> (Consulté le 26 décembre 2023).
46. AWE, Yewande (1^{er} septembre 2022). « Tout ce que vous devez savoir sur le changement climatique et la pollution atmosphérique », *Banque Mondiale*, Article - Enjeux climatiques : décryptage, <https://www.banquemondiale.org/fr/news/feature/2022/09/01/what-you-need-to-know-about-climate-change-and-air-pollution>.
47. SCHNEIDER, Tapio, Colleen M. KAUL et Kyle G. PRESSEL (25 février 2019). « Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming », *Nature Geoscience*, 12, 163–167, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0310-1>.
48. DAKOS, Vasilis, Chris A. BOULTON, Josh E. BUXTON, Jesse F. ABRAMS, David I. ARMSTRONG MCKAY, Sebastian BATHIANY, Lana BLASCHKE, Niklas BOERS, Daniel DYLEWSKY, Carlos LÓPEZ-MARTÍNEZ, Isobel PARRY, Paul RITCHIE, Bregje VAN DER BOLT, Larissa VAN DER LAAN, Els WEINANS, et Sonia KÉFI (7 août 2023). « Tipping Point Detection and Early-Warnings in climate, ecological, and human systems », *EGU sphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1773>.
49. DYLEWSKY Daniel, Timothy M. LENTON, Marten SCHEFFER, Thomas M. BURY, Christopher G. FLETCHER, Madhur ANAND et Chris T. BAUCH (5 avril 2023). « Universal early warning signals of phase transitions in climate systems », *Journal of The Royal Society Interface*, 20, 201, <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0562>.

50. LAPEYROLERIE, Marcus et Carl BOETTIGER (2023). « Limits to ecological forecasting: Estimating uncertainty for critical transitions with deep learning », *Methods in Ecology and Evolution*, 14, 3, 785–798, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14013>.
51. SMITA, Deb, Sahil SIDHEEKH, Christopher F. CLEMENTS, Narayanan KRISHNAN et Partha S. DUTTA. (16 février 2022). « Machine learning methods trained on simple models can predict critical transitions in complex natural systems. », *Royal Society Open Science*, 9, <https://doi.org/10.1098/rsos.211475>.
52. BOERS, Niklas (2021). « Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation », *Nature Climate Change*, 11, 680–688, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>.
53. LU, Zhenghui, Naiming YUAN, Qing YANG, Zhuguo MA et Jürgen KURTHS (11 février 2021). « Early warning of the Pacific Decadal Oscillation phase transition using complex network analysis », *Geophysical Research Letters*, 48, 7, e2020GL091674, <https://doi.org/10.1029/2020GL091674>.
54. LEVER, J. Jelle, Ingrid A. VAN DE LEEMPUT, Els WEINANS, Rick QUAX, Vasilis DAKOS, Egbert H. VAN NES, Jordi BASCOMPTE et Marten SCHEFFER (Janvier 2020), « Foreseeing the future of mutualistic communities beyond collapse », *Ecology Letters*, 23, 1, 2-15, <https://doi.org/10.1111/ele.13401>.
55. ORGANISATION DES NATIONS UNIES (2022). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2022 – Eaux souterraines : Rendre visible l'invisible*, UNESCO, Paris, 270 p., https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380743_fre.

56. KLEIJN, David, Rachael WINFREE, Ignasi BARTOMEUS, Luísa G. CARVALHEIRO, Mickaël HENRY, Rufus ISAACS, Alexandra-Maria KLEIN, Claire KREMEN, Leithen K M'GONIGLE, Romina RADER, Taylor H RICKETTS, Neal M. WILLIAMS, Nancy Lee ADAMSON, John S. ASCHER, András BÁLDI, Péter BATÁRY, Faye BENJAMIN, Jacobus C. BIESMEIJER, Eleanor J. BLITZER, Riccardo BOMMARCO, Mariëtte R. BRAND, Vincent BRETAGNOLLE, Lindsey BUTTON, Daniel P. CARIVEAU, Rémy CHIFFLET, Jonathan F. COLVILLE, Bryan N. DANFORTH, Elizabeth ELLE, Michael P. D. GARRATT, Felix HERZOG, Andrea HOLZSCHUH, Brad G. HOWLETT, Frank JAUKER, Shalene JHA, Eva KNOP, Kristin M KREWENKA, Violette LE FÉON, Yael MANDELIC, Emily A. MAY, Mia G. PARK, Gideon PISANTY, Menno REEMER, Verena RIEDINGER, Orianne ROLLIN, Maj RUNDLÖF, Hillary S. SARDIÑAS, Jeroen SCHEPER, Amber R. SCILIGO, Henrik G. SMITH, Ingolf STEFFAN-DEWENTER, Robbin THORP, Teja TSCHARNTKE, Jort VERHULST, Blandina F. VIANA, Bernard E. VAISSIÈRE, Ruan VELDTMAN, Kimiora L. WARD, Catrin WESTPHAL et Simon G POTTS (2016). « Delivery of crop pollination services is an insufficient argument for wild pollinator conservation ». *Nature Communications*, 353, 6296, 288-289, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26079893/>.

57. DÍAZ, Sandra, Josef SETTELE, Eduardo BRONDÍZIO, Hien T. NGO, Maximilien GUÈZE, John AGARD, Almut ARNETH, Patricia BALVANERA, Kate BRAUMAN, Stuart BUTCHART, Kai CHAN, Lucas A. GARIBALDI, Kazuhito ICHII, Jianguo LIU, Suneetha Mazhenchery SUBRAMANIAN, Guy F. MIDGLEY, Patricia MILOSLAVICH, Zsolt MOLNÁR, David OBURA, Alexander PFAFF, Stephen POLASKY, Andy PURVIS, Jona RAZZAQUE, Belinda REYERS, Rinkhu Roy CHOWDHURY, Yunne-Jai SHIN, Ingrid VISSEREN-HAMAKERS, Katherine WILLIS et Cynthia ZAYAS (1^{er} décembre 2019). *Le rapport de l'évaluation mondiale 2019 de l'IPBES de la biodiversité et les services écosystémiques : Résumé à l'intention des décideurs*, IPBES secrétariat, Bonn, Allemagne. 56 p., <https://bi.chm-cbd.net/fr/documents/rapport-evaluation-mondiale-2019-ipbes-biodiv-service-ecosystemique>.
58. HENSON, Stephanie A., Charlotte LAUFKÖTTER, Shirley LEUNG, Sarah L. C. GIERING, Hilary I. PALEVSKY et Emma L. CAVAN (8 avril 2022). *Uncertain response of ocean biological carbon export in a changing world*. *Nature Geoscience*. 15, 248–254, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00927-0>.
59. BOYCE, D., M. LEWIS, et B. WORM (29 juillet 2010). « Global phytoplankton decline over the past century », *Nature*, 466, 591-596, <https://www.nature.com/articles/nature09268>.
60. OUATTARA, Zié Adama, Armand Ketcha Malan KABLAN, Narcisse Zégbé GAHI, Vital NDOUFFOU et Kouassi DONGO (2021). « Analyse des facteurs anthropiques et des risques sanitaires associés aux inondations par débordement d'un canal d'évacuation des eaux à Abidjan », *Environnement, Risques & Santé*, 20, 5, 467-482, <https://doi.org/10.1684/ers.2021.1583>.

61. ONU (2 février 2022). « Madagascar : branle-bas de combat du gouvernement et de l'ONU à l'approche du cyclone tropical Emnati », *ONU Info, Climat et environnement*, <https://news.un.org/fr/story/2022/02/1114852>.
62. BLACK, Simon et Ian PARRY, I. (2023). « Les subventions aux combustibles fossiles ont atteint le niveau record de 7 000 milliards de dollars », *Fonds monétaire international*, <https://www.imf.org/fr/Blogs/Articles/2023/08/24/fossil-fuel-subsidies-surged-to-record-7-trillion>.
63. AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (Octobre 2023). *World Energy Outlook 2023*, France, 355 p., <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023?ref=aretenews.com&language=fr>.
64. AGENCE SCIENCE-PRESSE (20 novembre 2023). « Climat : pour la première fois, la zone des 2 degrés », <https://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2023/11/20/climat-pour-premiere-fois-zone-2-degres>.
65. DEMOUSTIER, Séverine (2021). « Le pouvoir d'agir des personnes en situation de vulnérabilité : un nouveau paradigme à partir duquel le travail social peut se réinventer? », *Sciences & Actions Sociales*, 15, 154-176, <https://doi.org/10.3917/sas.015.0154>.
66. LUYCKX, Charlotte (2020). « L'écologie intégrale : relier les approches, intégrer les enjeux, tisser une vision », *La Pensée écologique*, 6, 77-95, <https://doi.org/10.3917/lpe.006.0077>.
67. BÈS, Gaultier, Marianne DURANO et Alex Nørgaard ROKVAM (2014). *Nos limites. Pour une écologie intégrale*. Paris : Le Centurion, 112 p.

68. BATHO, Delphine (2019). *Écologie intégrale. Le manifeste*. Paris, Édition du Rocher.
69. SCHEFFER, Marten, Jordi BASCOMPTE, William A. BROCK, Victor BROVKIN, Stephen R. CARPENTER, Vasilis DAKOS, Hermann HELD, Egbert H. VAN NES, Max RIETKERK et George SUGIHARA (3 septembre 2009). « Early-warning signals for critical transitions », *Nature* 461, 53–59, <https://doi.org/10.1038/nature08227>.
70. LENTON, Timothy M. (Juillet 2011). « Early warning of climate tipping points », *Nature Climate Change*, 1, 201–209. <https://www.nature.com/articles/nclimate1143>.
71. Steffen, WILL, Katherine RICHARDSON, Johan ROCKSTRÖM, Sarah E. CORNELL, Ingo FETZER, Elena M. BENNETT, Reinette BIGGS, Stephen R. CARPENTER, Wim DE VRIES, Cynthia A. DE WIT, Carl FOLKE, Dieter GERTEN, Jens HEINKE, Georgina M. MACE, Linn M. PERSSON, Veerabhadran RAMANATHAN, Belinda REYERS et Sverker SÖRLIN (15 janvier 2015) « Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet », *Science*, 347, 6223, 1259855(2015), DOI:10.1126/science.1259855, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1259855>.
72. BURY, Thomas M., R. I. SUJITH, Induja PAVITHRAN, Marten SCHEFFER, Timothy M. LENTON, Madhur ANAND et Chris T. BAUCH C. T. (20 septembre 2021). « Deep learning for early warning signals of tipping points », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118, 39, e2106140118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2106140118>.

73. DUTTA, Partha Sharathi, Yogita SHARMA, Karen C. ABBOTT (21 février 2018). « Robustness of early warning signals for catastrophic and non-catastrophic transitions », *Oikos*, 127, 9, 1251–1263, <https://doi.org/10.1111/oik.05172>.
74. JOHANSEN, Geir Odd, Dmitry PROZORKEVICH, Alexander TROFIMOV, Randi INGVALDSEN, Tatiana PROKHOROVA, Bjørn Einar GRØSVIK, Pavel KRIVOSHEYA, Espen BAGØIEN, Sarah Joanne LERCH, Irina PROKOPCHUK, Elena ERIKSEN, Berengere HUSSON, Georg SKARET, Edda JOHANNESSEN, Bjarne BOGSTAD, Kristin WINDSLAND, Hannes HÖFFLE, Rupert WIENERROITHER, Carsten HVIINGEL, Andrey DOLGOV, Ann Merete HJELSET, Sergey BAKANEV, Aleksei STESKO, Lis lindal JØRGENSEN, Nils ØIEN, Frederike BOEHM, Natalia STRELKOVA, Daria BLINOVA, Roman KLEPIKOVSKIY et Per FAUCHALD (7 novembre 2023). *Survey report from the joint Norwegian/Russian Ecosystem Survey in the Barents Sea and the adjacent waters*, August-December 2022, Report series: IMR-PINRO 2023-10 Project No: 14153, <https://www.hi.no/en/hi/nettrapporter/imr-pinro-en-2023-10>.
75. NOBRE, Paulo, Sandro F. VEIGA, Emanuel GIAROLLA, André L. MARQUEZ, Manoel B. DA SILVA JR., Vinícius B. CAPISTRANO, Marta MALAGUTTI, Julio P. R. FERNANDEZ, Helena C. SOARES, Marcus J. BOTTINO, Paulo Y. KUBOTA, Silvio N. FIGUEROA, José P. BONATTI, Gilvan SAMPAIO, Fernanda CASAGRANDE, MABEL C. COSTA et Carlos A. NOBRE (23 septembre 2023). « AMOC decline and recovery in a warmer climate », *Scientific Reports*, 13, 15928, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43143-5>.

76. LOHMANN, Johannes, Henk A. DIJKSTRA, Markus JOCHUM, Valerio LUCARINI et Peter D. DITLEVSEN (12 avril 2023). « Multistability and intermediate tipping of the Atlantic Ocean circulation », *ArXivLabs*, <https://arxiv.org/abs/2304.05664>.
77. CLARK, Daniel O., Donald L. PATRICK, David GREMBOWSKI et Mary L. DURHAM (Août 1995). « Socioeconomic status and exercise self-efficacy in late life », *Journal of Behavioral Medicine*, 8, 355-376, <https://doi.org/10/bjddw6>.
78. DRURY, John, David NOVELLI et Clifford STOTT (10 octobre 2013). « Psychological disaster myths in the perception and management of mass emergencies », *Journal of Applied Social Psychology*, 43, 11, 2259-2270, <https://doi.org/10.1111/jasp.12176>.
79. DRURY, John, Stephen REICHER et Clifford STOTT (16 juin 2020). « COVID-19 in context: Why do people die in emergencies? It's probably not because of collective psychology », *British Journal of Social Psychology*, 59, 3, 686-693, <https://doi.org/10/gg3hr4>.

80. RICHARDSON, Katherine, Will STEFFEN, Wolfgang LUCHT, Jørgen BENDTSEN, Sarah E. CORNELL, Jonathan F. DONGES, Markus DRÜKE, Ingo FETZER, Govindasamy BALA, Werner VON BLOH, Georg FEULNER, Stephanie FIEDLER, Dieter GERTEN, Tom GLEESON, Matthias HOFMANN, Willem HUISKAMP, Matti KUMMU, Chinchu MOHAN, David NOGUÉS-BRAVO, Stefan PETRI, Miina PORKKA, Stefan RAHMSTORF, Sibyll SCHAPHOFF, Kirsten THONICKE, Arne TOBIAN, Vili VIRKKI, Lan WANG-ERLANDSSON, Lisa WEBER et Johan ROCKSTRÖM (13 septembre 2023). « Earth beyond six of nine planetary boundaries », *Science Advances*, 9, 37, eadh2458, DOI:10.1126/sciadv.adh2458, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>.
81. BOCHOW, Nils et Niklas BOERS (2023). « The South American monsoon approaches a critical transition in response to deforestation », *Science Advances*, 9, 40, eadd9973, DOI:10.1126/sciadv.add9973, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add9973>.
82. PAXMAN, Guy J. G., Jacqueline AUSTERMANN et Andrew HOLLYDAY (6 juillet 2022). « Total isostatic response to the complete unloading of the Greenland and Antarctic Ice Sheets », *Scientific Reports*, 12, 11399, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15440-y>.

83. CHRYSAFI, Anna, Vili VIRKKI, Mika JALAVA, Vilma SANDSTRÖM, Johannes PIIPPONEN, Miina PORKKA, Steven J. LADE, Kelsey LA MERE, Lan WANG-ERLANDSSON, Laura SCHERER, Lauren S. ANDERSEN, Elena BENNETT, Kate A. BRAUMAN, Gregory S. COOPER, Adriana DE PALMA, Petra DÖLL, Andrea S. DOWNING, Timothy C. DUBOIS, Ingo FETZER, Elizabeth A. FULTON, Dieter GERTEN, Hadi JAAFAR, Jonas JÄGERMEYR, Fernando JARAMILLO, Martin JUNG, Helena KAHILUOTO, Luis LASSALETTA, Anson W. MACKAY, Daniel MASON-D'CROZ, Mesfin M. MEKONNEN, Kirsty L. NASH, Amandine V. PASTOR, Navin RAMANKUTTY, Brad RIDOUTT, Stefan SIEBERT, Benno I. SIMMONS, Arie STAAL, Zhongxiao SUN, Arne TOBIAN, Arkaitz USUBIAGA-LIAÑO, Ruud J. VAN DER ENT, Arnout VAN SOESBERGEN, Peter H. VERBURG, Yoshihide WADA, Sam ZIPPER et Matti KUMMU (2022). « Quantifying Earth system interactions for sustainable food production via expert elicitation », *Nature Sustainability*, 5, 830–842, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00940-6>.
84. HAMMOND, William M., A. Park WILLIAMS, John T. ABATZOGLOU, Henry ADAMS, Tamir KLEIN, Rosana LÓPEZ, Cuahtémoc SÁENZ-ROMERO, Henrik HARTMANN, David D. BRESHEARS, et Craig D. ALLEN. (5 avril 2022). « Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests », *Nature Communications*, 13, 1761, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>.
85. ZHUANG, Bingliang, Yiman GAO, Yaxin HU, Huimin CHEN, Tijian WANG, Shu LI, Mengmeng LI et Min XIE (2023) « Interaction between different mixing aerosol direct effects and East Asian summer monsoon », *Climate Dynamics*, 61, 1157–1176, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06617-2>.

86. MONERIE, Paul-Arthur, Laura J. WILCOX, et Andrew G. TURNER (25 mars 2022). « Effects of Anthropogenic Aerosol and Greenhouse Gas Emissions on Northern Hemisphere Monsoon Precipitation: Mechanisms and Uncertainty », *Journal of Climate*, 35, 2305–2326, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0412.1>.
87. VIRKKI, Vili, Elina ALANÄRÄ, Miina PORKKA, Lauri AHOPELTO, Tom GLEESON, Chinchu MOHAN, Lan WANG-ERLANDSSON, Martina FLÖRKE, Dieter GERTEN, Simon N. GOSLING, Naota HANASAKI, Hannes Müller SCHMIED, Niko WANDERS et Matti KUMMU (2022). « Globally widespread and increasing violations of environmental flow envelopes », *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 12, 3315–3336, <https://doi.org/10.5194/hess-26-3315-2022>.
88. PASTOR, A. V., H. BIEMANS, W. FRANSSSEN, D. GERTEN, H. HOFF, F. LUDWIG et P. KABAT. (24 octobre 2022). « Understanding the transgression of global and regional freshwater planetary boundaries ». *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 380, 2238, <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0294>.
89. CRICHTON, Katherine A., Jamie D. WILSON, Andy RIDGWELL, Flavia BOSCOLO-GALAZZO, Eleanor H. JOHN, Bridget S. WADE et Paul N. PEARSON (27 avril 2023). « What the geological past can tell us about the future of the ocean's twilight zone », *Nature Communications*, 14, 2376, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37781-6>.
90. KLEIDON, Axel. (8 juillet 2021). « Physical Limits of Wind Energy Within the Atmosphere and its Use as Renewable Energy: From the Theoretical Basis to Practical Implications », *Meteorologische Zeitschrift*, 30, 3, 203–225, <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1062>.

91. HAN, Siqi, Guoyong LENG et Linfei YU (2023). « Review of quantitative applications of the concept of the water planetary boundary at different spatial scales », *Water Resources Research*, 59, 4, e2022WR033646, <https://doi.org/10.1029/2022WR033646>.
92. NOAA Coral Reef Watch. 2019, updated daily. NOAA Coral Reef Watch Version 3.1 Daily 5 km Satellite Regional Virtual Station Time Series Data for Southeast Florida, Mar. 12, 2013-Mar. 11, 2014. College Park, Maryland, USA: NOAA Coral Reef Watch, Data set accessed 2020-02-05 at <https://coralreefwatch.noaa.gov/product/vs/data.php>.
93. SKIRVING, William, Benjamin MARSH, Jacqueline DE LA COUR, Gang LIU, Andy HARRIS, Eileen MATURI, Erick GEIGER et Mark EAKIN (25 novembre 2022). « Coral Temp and the Coral Reef Watch Coral Bleaching Heat Stress Product Suite Version 3.1 », *Remote Sensing*, 12, 23, 3856, <https://doi.org/10.3390/rs12233856>.
94. NASA Ocean Biology Processing Group. (2019). *Ancillary Data Sources*, Retrieved from <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.
95. JOZEF, Gina C., Robert KLINGEL, John J. CASSANO, Björn MARONGA, Gijs DE BOER, Sandro DAHLKE et Christopher J. COX (4 juillet 2023). « Derivation and compilation of lower atmospheric properties relating to temperature, wind, stability, moisture, and surface radiation budget over the central Arctic sea ice during MOSAiC », *Earth System Science Data*, [Preprint], DOI:10.5194/essd-2023-141, <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2023-141/essd-2023-141.pdf>.

96. ALLEY, Karen, Christian T. WILD, Adrian LUCKMAN, Ted A. SCAMBOS, Martin TRUFFER, Erin C. PETTIT, Atsuhiko MUTO, Bruce WALLIN, Marin KLINGER, Tyler SUTTERLEY, Sarah F. CHILD, Cyrus HULEN, Jan T. M. LENAERTS, Michelle MACLENNAN, Eric KEENAN et Devon DUNMIRE (22 novembre 2021). « Two decades of dynamic change and progressive destabilization on the Thwaites Eastern Ice Shelf », *The Cryosphere*, 15, 11, 5187–5203, <https://tc.copernicus.org/articles/15/5187/2021/>.
97. WEATHERALL, P., C. BRINGENSPARR, C. F. CASTRO, B. DORSCHER, H. DRENNON, V. L. FERRINI, H. A. HARPER, L. HEHEMANN, M. JAKOBSSON, P. JOHNSON, J. KINNEY, K. MACKAY, S. M. MAHER, T. V. MARTIN, L. A. MAYER, J. MCMICHAEL-PHILLIPS, R. MOHAMMAD, F. O. NITSCHKE, J. ROPEREZ, D. T. SANDWELL, H. SNAITH, B. TOZER, S. VIQUERAT, F. WARNKE et Y. YU (Juin 2022) « The GEBCO 2022 Grid - A Continuous Terrain Model of the Global Oceans and Land », *NERC EDS British Oceanographic Data Centre NOC*, Database, <https://ccom.unh.edu/publications/gebco-2022-grid-continuous-terrain-model-global-oceans-and-land>.
98. STEFFEN, Will, Johan ROCKSTRÖM, Katherine RICHARDSON, Timothy M. LENTON, Carl FOLKE, Diana LIVERMAN D, Colin P. SUMMERHAYES, Anthony D. BARNOSKY, Sarah E. CORNELL, Michel CRUCIFIX, Jonathan F. DONGES, Ingo FETZER, Steven J. LADE, Marten SCHEFFER, Ricarda WINKELMANN et Hans Joachim SCHELLNHUBER (6 août 2018). « Trajectories of the Earth System in Anthropocene », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115, 33, 8252-8259, DOI:10.1073/pnas.1810141115, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30082409/>.

99. BROUSSELLE, Astrid, CURREN, Megan, DUNBAR, Bronwyn, MCDAVID, James, LOGTENBERG, Rik, et NEY, Tara. (Janvier 2024). « Planetary health: Creating rapid impact assessment tools. Evaluation », Preprint, OnlineFirst, <https://doi.org/10.1177/13563890241227433>.
100. WANG-ERLANDSSON, Lan, Arne TOBIAN, Ruud J. VAN DER ENT, Ingo FETZER, Sofie te WIERIK, Miina PORKKA, Arie STAAL, Fernando JARAMILLO, Heindriken DAHLMANN, Chandrakant SINGH, Peter GREVE, Dieter GERTEN, Patrick W. KEYS, Tom GLEESON, Sarah E. CORNELL, Will STEFFEN, Xuemei BAI et Johan ROCKSTRÖM (26 avril 2022). « A planetary boundary for green water », *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 380–392, <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>.
101. ROCKSTRÖM, Johan, Joyeeta GUPTA, Dahe QIN, Steven J. LADE, Jesse F. ABRAMS, Lauren S. ANDERSEN, David I. Armstrong MCKAY, Xuemei BAI, Govindasamy BALA, Stuart E. BUNN, Daniel CIOBANU, Fabrice DECLERCK, Kristie EBI, Lauren GIFFORD, Christopher GORDON, Syezlin HASAN, Norichika KANIE, Timothy M. LENTON, Sina LORIANI, Diana M. LIVERMAN, Awaz MOHAMED, Nebojsa NAKICENOVIC, David OBURA, Daniel OSPINA, Klaudia PRODANI, Crelis RAMMELT, Boris SAKSCHEWSKI, Joeri SCHOLTENS, Ben STEWART-KOSTER, Thejna THARAMMAL, Detlef VAN VUUREN, Peter H. VERBURG, Ricarda WINKELMANN, Caroline ZIMM, Elena M. BENNETT, Stefan BRINGEZU, Wendy BROADGATE, Pamela A. GREEN, Lei HUANG, Lisa JACOBSON, Christopher NDEHEDEHE, Simona PEDDE, Juan ROCHA, Marten SCHEFFER, Lena SCHULTE-UEBBING, Wim DE VRIES, Cunde XIAO, Chi XU, Xinwu XU, Noelia ZAFRA-CALVO et Xin ZHANG (31 mai 2023). « Safe and just Earth system boundaries », *Nature*, 619, 102–111, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>.

102. HAUMANN, F. Alexander, François MASSONNET, Paul R. HOLLAND, Mitchell BUSHUK, Ted MAKSYM, Will HOBBS, Michael P. MEREDITH, Ivana CEROVEČKI, Thomas LAVERGNE, Walter N. MEIER, Marilyn RAPHAEL et Sharon STAMMERJOHN (26 février 2023). « An abrupt transition in the Antarctic Sea ice-ocean system », *EGU General Assembly*, Vienna, Austria, 24-28, EGU23-8749, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-8749>.
103. CHRYSAFI, Anna, Vili VIRKKI, Mika JALAVA, Vilma SANDSTRÖM, Johannes PIIPPONEN, Miina PORKKA, Steven J. LADE, Kelsey LA MERE, Lan WANG-ERLANDSSON, Laura SCHERER, Lauren S. ANDERSEN, Elena BENNETT, Kate A. BRAUMAN, Gregory S. COOPER, Adriana DE PALMA, Petra DÖLL, Andrea S. DOWNING, Timothy C. DUBOIS, Ingo FETZER, Elizabeth A. FULTON, Dieter GERTEN, Hadi JAAFAR, Jonas JÄGERMEYR, Fernando JARAMILLO, Martin JUNG, Helena KAHILUOTO, Luis LASSALETTA, Anson W. MACKAY, Daniel MASON-D'CROZ, Mesfin M. MEKONNEN, Kirsty L. NASH, Amandine V. PASTOR, Navin RAMANKUTTY, Brad RIDOUTT, Stefan SIEBERT, Benno I. SIMMONS, Arie STAAL, Zhongxiao SUN, Arne TOBIAN, Arkaitz USUBIAGA-LIAÑO, Ruud J. VAN DER ENT, Arnout VAN SOESBERGEN, Peter H. VERBURG, Yoshihide WADA, Sam ZIPPER et Matti KUMMU (15 août 2022). « Quantifying Earth system interactions for sustainable food production via expert elicitation », *Nature Sustainability*, 5, 830–842, <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00940-6>.
104. LIU, Teng, Dean CHEN, Lan YANG, Jun MENG, Zanchenling WANG, Josef LUDESCHER, Jingfang FAN, Saini YANG, Deliang CHEN, Jürgen KURTHS, Xiaosong CHEN, Shlomo HAVLIN et Hans Joachim SCHELLNHUBER (5 janvier 2023). « Teleconnections among tipping elements in the Earth system », *Nature Climate Change*, 13, 67–74, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01558-4>.

105. LENTON, Timothy M., Hermann HELD, Elmar KRIEGLER, Jim W. HALL, Wolfgang LUCHT, Stefan RAHMSTORF et Hans Joachim SCHELLNHUBER. (12 février 2008). « Tipping elements in the Earth's climate system », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 6, 1786-1793, <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>.
106. LENTON, Timothy M. et Hywel T. P. WILLIAMS (Juillet 2013). « On the origin of planetary-scale tipping points », *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 7, 380-382. Epub, PMID:23777818, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.06.001>.
107. LENTON, Timothy M. (18 août 2021). « Tipping points in the climate system », *Weather*, 76, 10, 325-326, <https://doi.org/10.1002/wea.4058>.
108. RIEKE, Ole, Marius ÅRTHUN et Jakob DÖRR (4 avril 2023). « Rapid sea ice changes in the future Barents Sea », *The Cryosphere*, 17, 4, 1445–1456, <https://doi.org/10.5194/tc-17-1445-2023>, <https://tc.copernicus.org/articles/17/1445/2023/>.
109. HUMAN RIGHT WATCH (8 juin 2021). « Questions-réponses sur les subventions aux combustibles fossiles », <https://www.hrw.org/fr/news/2021/06/08/questions-reponses-sur-les-subventions-aux-combustibles-fossiles>.
110. DONEY, Scott C., D. Shallin BUSCH, Sarah R. COOLEY et Kristy J. KROEKER (Octobre 2020). « The Impacts of Ocean Acidification on Marine Ecosystems and Reliant Human Communities », *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 83-112, <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-environ-012320-083019>.

111. IGN (16 octobre 2023). « Memento – Inventaire Forestier national », *Institut national de l'information géographique et forestière de France*, 7, 1-72, <https://www.calameo.com/read/0011885824b3223855516>.
112. DÍAZ, Sandra Josef SETTELE, Eduardo S. BRONDÍZIO, Hien T. NGO, John AGARD, Almut ARNETH, Patricia BALVANERA, Kate A. BRAUMAN, Stuart H. M. BUTCHART, Kai M. A. CHAN, Lucas A. GARIBALDI, Kazuhito ICHII, Jianguo LIU, Suneetha M. SUBRAMANIAN, Guy F. MIDGLEY, Patricia MILOSLAVICH, Zsolt MOLNÁR, David OBURA, Alexander PFAFF, Stephen POLASKY, Andy PURVIS, Jona RAZZAQUE, Belinda REYERS, Rinku Roy CHOWDHURY, Yunne-Jai SHIN, Ingrid VISSEREN-HAMAKERS, Katherine J. WILLIS et Cynthia N. ZAYAS. (2019). « Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change », *Science*, 366, DOI:10.1126/science.aax, 3100, <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>.
113. DE TAVERNIER, Johan, Kingsley NDUBUEZE (1^{er} janvier 2024). « Laudato Si's View on Integral Ecology in Light of the Planetary Boundaries Concept », *New Blackfriars, Cambridge Core*, 101, 1096, 740-759, DOI:10.1111/nbfr.12500, <https://doi.org/10.1111/nbfr.12500>.
114. COPERNICUS (7 décembre 2023) « Record warm November consolidates 2023 as the warmest year », *Monthly climate bulletin*, <https://climate.copernicus.eu/record-warm-november-consolidates-2023-warmest-year>

[Stéphane Bilodeau](#), Ph. D., est ingénieur, *Fellow* d'ingénieurs Canada et professeur adjoint au Département de bio-ingénierie de l'Université McGill.



STIM-CS

Cet essai effectue un tour d'horizon des principaux points de bascule liés au changement climatique (CTP), lesquels menacent notre environnement, nos infrastructures et nos sociétés. Leurs répercussions potentielles seront encore plus désastreuses que ce qui est déjà observé aux plans de l'élévation du niveau de la mer, de la perte de biodiversité et des extrêmes météorologiques... Or, les CTP devraient être pris en considération dans l'urgence climatique et dans les pratiques durables de réduction des émissions de gaz à effet de serre et d'atténuation des conséquences du changement climatique. Sont donc préconisées des stratégies innovantes et efficaces, à petite et grande échelle, des pratiques agricoles durables, des efforts de conservation de l'eau et des politiques publiques adaptées. L'essai souligne l'importance de la réduction des subventions aux combustibles fossiles, de la promotion des énergies renouvelables et de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans la prévision et l'analyse. En bref, il est crucial d'agir efficacement, de façon créative et holistique pour assurer un avenir durable aux générations actuelles et à venir.

Ce livre a été publié au Québec

Dépôt légal : Février 2024

ISBN : 978-2-9822218-0-2

