NATHANAËL WALLENHORST

2049

CE QUE LE CLIMAT VA FAIRE À L'EUROPE

Seuil

2049

Ce que le climat va faire à l'Europe

Nathanaël Wallenhorst

2049

Ce que le climat va faire à l'Europe

Éditions du Seuil
57, rue Gaston-Tessier, Paris XIX[e]

ISBN 978-2-02-158449-3

© Editions du Seuil, septembre 2025

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

www.seuil.com

À Noémi, Mathis et Anna

« La Terre est la quintessence même de la condition humaine, et la nature terrestre, pour autant que l'on sache, pourrait bien être la seule de l'univers à procurer aux humains un habitat où ils puissent se mouvoir et respirer sans effort et sans artifice[1]. »

Hannah Arendt

« Notre plus grande responsabilité est d'être de bons ancêtres[2]. »

Jonas Salk

Sommaire

Introduction – *2049* comme une image 13

1. La non-linéarité 17
2. La chaleur mortelle. 43
3. La pénurie 77
4. Le dépeuplement 109
5. La contamination 143
6. L'imprévisible. 177
7. La faim. 199
8. La migration et la guerre 231
9. Le chaos 257

Conclusion – Pour que *2049* n'advienne jamais 273
Notes 275
Remerciements. 319

Introduction

2049 comme une image

Je conçois *2049* non comme une date, mais comme une image. Celle d'un monde à venir, avec des sociétés humaines explosées par les ruptures que nous créons sur la Terre. C'est une image difficile à voir. Elle résulte de la familiarisation avec des milliers d'articles académiques, de tous champs disciplinaires, accumulés depuis plus de dix ans.

2049, c'est un futur dystopique. C'est un réel en train de se faire, appréhendé à partir d'un faisceau d'analyses scientifiques. Pour cela il est nécessaire de maîtriser une boîte à outils, constituée de savoirs biogéophysiques, d'éléments techniques comme des controverses scientifiques en cours. Cette boîte à outils, c'est la compréhension de ce que j'appelle dans cet ouvrage le système Terre, entendu comme la résultante de trois ensembles : le climat, les écosystèmes de la biosphère et nos sociétés.

Les sciences du système Terre sont une forme de fédération disciplinaire qui étudie notre planète comme un système dynamique et complexe, un système interconnecté et sensible aux perturbations globales. Ses racines remontent à certaines des idées du XVIII^e^ siècle, comme celles du géologue écossais James Hutton sur la « théorie de la Terre », et aux travaux du biogéochimiste russo-ukrainien Vladimir Vernadski sur la biosphère au début du XX^e^ siècle. Ensuite c'est dans la seconde moitié

du XX^e siècle que les sciences du système Terre ont émergé formellement, notamment grâce à des initiatives scientifiques comme l'Année géophysique internationale (1957-1958), événement préparé au cours de la décennie précédente, qui regroupe 67 États lors d'une période d'intense activité solaire et a permis de faire avancer la compréhension de la planète bleue comme système complexe. Les évolutions technologiques, et notamment l'avènement de l'informatique, ont ensuite permis de développer des modèles numériques capables de simuler les interactions entre les différentes dimensions de la Terre (les « sphères » : biosphère, atmosphère, cryosphère, hydrosphère, lithosphère, etc.)[1].

Le concept d'Anthropocène, proposition de nouvelle époque géologique marquée par une transformation des conditions d'habitabilité de notre planète, introduit par les sciences du système Terre, a été une étape importante dans la formalisation de cette émergence disciplinaire, qui est alors venue interagir avec les sciences géologiques. Elles ont également été profondément marquées par la conceptualisation des *tipping points*, ou points de bascule, dans des sous-systèmes, comme la calotte glaciaire du Groenland ou l'Amazonie, où des perturbations peuvent entraîner des changements irréversibles.

J'utilise toutes ces données dans cet ouvrage, mais avec l'ambition de ne traiter que de nos sociétés. Le désastre écologique ne sera pas abordé au travers d'un autre objet que nous-mêmes. Quelles seront les conditions d'habitabilité de *2049* ? C'est l'unique question qui m'anime ici.

Dans le monde de la recherche, le savoir s'organise en silo, où chacun approfondit une expertise sans l'articuler aux autres données scientifiques. Cette compartimentation du savoir constitue une entrave pour les chercheurs à disposer d'une vision panoramique, pourtant essentielle dans la compréhension de la trajectoire des sociétés humaines.

Au contraire, travailler sur les conditions d'existence suppose

une articulation singulière des données scientifiques sans être cantonné à un champ disciplinaire. Cela implique, par exemple, d'appréhender l'Anthropocène à partir des savoirs géologiques et de leurs fondements stratigraphiques, sans oublier les savoirs systémiques, ni ceux des sciences humaines et sociales.

De la même façon, il s'agit de comprendre le fonctionnement des circulations atmosphériques et océaniques tout en s'appuyant sur les savoirs glaciologiques pour saisir la façon dont les glaces ont partie liée avec les océans et l'atmosphère, en intégrant une analyse du capitalisme globalisé pour qui les démocraties sont la dernière limite à faire tomber[2].

C'est cette vision singulière du monde, procédant de la compréhension de la matière, que je veux partager ici. Les conditions qui permettent l'existence humaine vivent de profonds bouleversements. Une dynamique non linéaire reliant les causes à leurs effets est en train de changer toute notre compréhension de la Terre et notre manière d'habiter le monde : la mort, soigneusement mise à distance dans nos sociétés occidentales, fait son grand retour ; la pénurie et les famines que nous avons réussi à évincer se frayent une place de choix dans nos vies. Mais c'est aussi au dépeuplement de la Terre que nous devons faire face, à l'expérience systématique de la contamination de nos propres corps, au surgissement permanent de l'imprévisible, aux migrations et aux guerres.

Au cœur des conditions qui permettent nos existences apparaît progressivement le chaos. Fondamentalement, c'est la désaffiliation et l'esseulement qui nous guettent : comment être ensemble, nous soutenir et nous aimer, dans un environnement où tout nous serait devenu hostile ? C'est à ces questions, aussi, que tentera de répondre cet ouvrage sur nos nouvelles conditions d'habiter *2049*. Dans le premier chapitre, je partage la méthode me permettant d'anticiper les conséquences concrètes du dérèglement climatique dans les décennies à venir. Dans les chapitres suivants, je décris ces projections.

1
La non-linéarité

Blanchiment puis disparition massive de récifs coralliens, sécheresses dans la forêt amazonienne, dégel de vastes régions de permafrost en Sibérie, recul irréversible d'une partie de la calotte glaciaire de l'Antarctique occidental, perte de la glace de mer arctique… Avec +1,2 °C de réchauffement climatique global, certaines transformations extraordinaires sont déjà en train de voir le jour. Loin d'être anodins, ces bouleversements sont autant de points de basculement du système Terre, le moment où s'engage un processus dont les conséquences sont non proportionnelles avec ce qui les a déclenchées.

Une menace pour la stabilité de nos sociétés

Prenons un exemple. Lorsque nous soufflons dans un ballon de baudruche, son volume augmente de façon proportionnelle au flux d'air que nous injectons… jusqu'à ce qu'un petit centimètre cube supplémentaire le fasse exploser et le déchiquette. L'effet est non proportionnel ou non linéaire avec la cause. Le moment où le ballon explose est ce qu'on appelle un *tipping point*, en anglais, ou point de basculement. Le passage de l'état où le ballon réagit proportionnellement à nos stimuli à un autre état, explosé et qui ne peut plus contenir le moindre

centimètre cube d'air, est brusque et irréversible. Aucun retour en arrière ne sera jamais possible.

C'est à ce type de processus que répond la Terre. Ces logiques non linéaires ou non proportionnelles sont un type de corrélation qui ne nous est pas familier : elles sont propres aux systèmes complexes, qui sont, par essence, bourrés d'incertitudes et très difficiles à modéliser. Notre cerveau, le corps humain, un écosystème, nos systèmes économiques et sociaux sont des systèmes complexes. Ils sont caractérisés par les interactions entre leurs nombreuses composantes, et le comportement de l'ensemble ne se réduit pas à la simple addition des éléments individuels. Par différenciation, un système simple n'a que des interactions linéaires, comme un pendule qui suit les lois de la mécanique dont on peut déduire facilement le comportement global à partir de la somme des actions de ses parties. Contrairement au système complexe, le système simple est facilement prédictible. La Terre est un système complexe, qu'on appelle… le système Terre. Dans ce type de structure, un même stimulus ne donne jamais exactement la même réponse. Un peu comme quand la bille commence à dévaler la pente d'un flipper. On ne peut pas savoir exactement de quel côté elle va tomber. Cela étant dit, l'incertitude n'est pas complète, car elle est située dans un spectre : on sait d'emblée que la bille ne va ni remonter, ni sortir du flipper.

Que se passe-t-il après un *tipping point* ? Il y a une redoutable inversion entre ce qui est normal et ce qui est exceptionnel. Ce qui est un « événement exceptionnel » aujourd'hui, comme une vague de chaleur à plus de 40 °C durant quelques jours en France réduisant les rendements agricoles de 30 %, devient une « normalité » demain. Et la normalité du quotidien d'aujourd'hui, comme un climat stable et prévisible permettant de maîtriser les écosystèmes, de dégager des excédents agricoles nous permettant d'aller faire nos courses après être

allés chercher nos enfants à l'école ou faire du sport, n'existe plus demain.

Timothy Lenton, fondateur du Global Systems Institute à l'université d'Exeter, un chercheur britannique spécialisé dans la compréhension du système Terre qui compte parmi les scientifiques dont les travaux sont les plus cités au monde, ne mâche pas ses mots : « Les points de basculement néfastes dans le monde naturel constituent l'une des menaces les plus graves auxquelles l'humanité est confrontée. Leur déclenchement endommagera gravement les systèmes de survie de notre planète et menacera la stabilité de nos sociétés[1]. »

Dans la mécanique des points de basculement, les dommages postérieurs à leur franchissement sont sans commune mesure avec les impacts qui les ont causés. Ils s'accompagnent aussi d'effets en cascade sur nos systèmes sociaux et économiques – jusqu'à pouvoir dépasser les capacités d'adaptation des nations. « Les points de basculement négatifs montrent que la menace posée par la crise climatique et écologique est bien plus grave que ce que l'on croit généralement et qu'elle est d'une ampleur inédite pour l'humanité[2]. »

Et nos systèmes de gouvernance ne sont pas adaptés à cette menace existentielle qui pèse sur l'humanité : « Le monde est sur une trajectoire désastreuse. Le franchissement d'un point de basculement néfaste pourrait en déclencher d'autres, provoquant un effet domino de changements accélérés et ingérables dans nos systèmes de survie[3]. » C'est la raison pour laquelle l'approche actuellement privilégiée par nombre de décideurs encourageant un changement linéaire et progressif n'est plus envisageable. L'existence de *tipping points* met nécessairement fin au *business as usual*[4].

Les articles scientifiques : seule médiation permettant d'être dans le réel

Nous avons été éduqués à appréhender le monde de manière linéaire. Nous avons appris à nous le représenter comme une immense machine que nous pouvons transformer à notre guise. Or il ne se comporte pas de façon linéaire. Alors que nous rêvons de changements progressifs, la matérialité biogéophysique nous indique tout autre chose : des bouleversements brusques, parfois inattendus et souvent irréversibles.

Un des éléments clés de la réussite mondiale de l'humanité réside dans notre compréhension des points de basculement. C'est la méthode que nous allons utiliser tout au long de ce livre : traquer au sein de la littérature scientifique les *tipping points* climatiques et écosystémiques pour comprendre ce qu'ils peuvent faire à nos sociétés. Les savoirs scientifiques sont la seule médiation nous permettant d'être en prise avec le réel. Or, ces savoirs, parce qu'ils concernent le système complexe par excellence, sont organisés autour d'un paradigme non linéaire ou non proportionnel.

Un exemple : le climat européen est plutôt doux et humide. Il ne fait ni trop froid, ni trop chaud, ni trop humide, ni trop sec. Cela est dû à une grande circulation atmosphérique et océanique qui brasse l'océan Atlantique, qu'on appelle l'AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), et qui arrive sur le continent. Ce dernier agit comme un immense ventilateur offshore qui régule la température de l'hémisphère Nord et apporte de la chaleur et de l'humidité sur l'Europe. Mais il faut se rendre à l'évidence : le réchauffement climatique détraque le ventilo et un effondrement de l'AMOC fait partie des scénarios possibles. Cela générerait un refroidissement de la moyenne des températures de l'hémisphère Nord et un assèchement du climat européen entraînant une perte de la moitié

de la superficie mondiale aujourd'hui destinée à la culture du blé et du maïs. C'est ce qu'ont écrit 44 scientifiques dans une lettre ouverte fin octobre 2024 à destination des dirigeants du Conseil nordique des ministres[5].

Les *tipping points* : une notion scientifique pour transmettre une inquiétude

La première personne à avoir mobilisé le terme de *tipping point* est l'ingénieur spécialisé dans les instruments de mesure, et notamment dans le secteur de l'hydraulique, John C. Hoadley, dans un article de chimie publié en 1884 qui portait sur un compteur d'eau[6] pour décrire un changement qualitatif dans un système. *Tipping* est mobilisé ici dans le sens d'un mécanisme qui bascule lorsqu'un certain seuil de fonctionnement est atteint. On trouve également des éléments importants pour comprendre la mécanique des *tipping points* dans un article du mathématicien français Henri Poincaré publié à la même époque, en 1885, sur les formes d'équilibre et de bifurcation dans un système. Cet article écrit en français mentionne l'expression « forme de bifurcation », véritable objet de l'article[7], dont une traduction en anglais pourrait être relativement proche de *tipping point*.

Aujourd'hui encore la théorie de la bifurcation est mobilisée en mathématiques et en physique dans l'analyse des systèmes complexes[8]. De fait, les travaux de Poincaré ont eu une grande influence dans le développement des sciences modernes[9] : les mathématiciens et physiciens se sont intéressés au début du XX^e^ siècle à la façon dont des transitions soudaines pouvaient advenir dans des systèmes dynamiques. Cela a donné lieu dans les années 1970 à la *catastrophe theory* selon laquelle des petits changements dans les conditions initiales peuvent entraîner

des transitions abruptes dans le comportement d'un système[10] ou à des modélisations de bifurcations non linéaires au sein de la *chaos theory*, où un système peut passer d'un état stable à un autre de manière abrupte lorsqu'un paramètre critique est dépassé[11].

En parallèle de ces complexités théoriques, un *tipping point* est progressivement appréhendé dans une perspective physique pour faire référence à l'ajout d'un petit poids supplémentaire sur un objet en équilibre entraînant son renversement (de façon soudaine et complète). Exemple : alors que vous êtes tranquillement installé dans votre kayak, un ami s'amuse à chahuter votre embarcation jusqu'à ce qu'il donne la petite pichenette de trop. Votre kayak est alors renversé et vous êtes à l'eau. Le système « eau-kayak-kayakiste » est passé d'un premier état stable à un nouvel état stable.

C'est l'acception qu'en a donnée le politiste états-unien Morton M. Grodzins, qui étudiait les quartiers urbains aux États-Unis pour décrire le phénomène de départ des familles blanches d'un quartier lorsque le nombre de foyers noirs devenait trop important. Tandis qu'ils restaient sur place à l'arrivée d'un nombre restreint de Noirs, les Blancs déménageaient en nombre à l'arrivée de « la famille noire de trop »[12] – franchissant alors un *tipping point*. Ensuite l'économiste états-unien Thomas Schelling s'est appuyé sur les travaux de Morton Grodzins pour démontrer le processus selon lequel un quartier avec un mélange des races peut se transformer en un quartier ségrégué. Il a modélisé les conditions de l'équilibre de ces deux états stables (races mélangées, ségrégation) et les processus de passage d'un état à un autre (avec une explicitation de la notion de *tipping point*)[13].

Les travaux de Grodzins et Schelling ont ensuite été popularisés par le journaliste états-unien Malcolm Gladwell dans un livre publié en 2000, *The Tipping Point : How Little Thing Can Make*

a Big Difference (Little, Brown and Compagny) (« Le point de bascule : Comment faire une grande différence avec de petites choses »), qui a connu un grand succès pour décrire ce qui se passe lorsque, dans un système, un petit changement entraîne une grande différence. La conceptualisation de Gladwell n'est pas propre au fonctionnement du système Terre, elle porte sur les changements sociologiques de la vie quotidienne ou la transformation de certaines pratiques de consommation.

Mobilisation par les sciences du système Terre

Dans un article précurseur datant de 1961, l'océanographe états-unien Henry Stommel de l'université Harvard suggère que les océans pourraient passer d'un état stable à un autre lorsque la salinité dépasse un certain seuil, transformant alors les dynamiques de circulation océanique[14]. Plus tard, dans les années 1970, l'écologue canadien Crawford S. Holling travaille sur les perturbations des systèmes environnementaux et leurs réactions. Il mobilise le concept de résilience lorsqu'ils ont de multiples équilibres et qu'ils retrouvent leur équilibre initial après une perturbation. Réciproquement, Holling met en évidence que des changements dans les conditions externes peuvent conduire à des transitions abruptes en passant d'un état stable à un autre[15]. Ses travaux sur la non-linéarité et les seuils critiques dans les systèmes écologiques ont été très importants dans la conceptualisation future des *tipping points* en climatologie. Ils ont servi de socle pour introduire la question du risque dans la façon dont les responsables politiques appréhendent les questions climatiques.

Dans les années 1970-1980, il devient de plus en plus important que nos sociétés adoptent une nouvelle attitude face au risque climatique. C'est dans ce contexte que le politologue états-unien William C. Clark présente ses vues en 1985, lors de

la célèbre « Conférence internationale sur l'évaluation du rôle du gaz carbonique et d'autres constituants radiativement actifs dans les variations climatiques et leurs incidences » (la mission du GIEC verra le jour trois ans plus tard). Clark évoque les « seuils et impacts non linéaires » : « Un deuxième domaine de la science fondamentale qui préoccupe beaucoup les membres du Congrès est la question des seuils. Ils veulent savoir si l'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone pourrait un jour faire franchir un seuil au système naturel et confronter les décideurs politiques à une situation qui se détériore soudain si rapidement qu'elle réduit à néant les capacités d'adaptation des sociétés. Cette question domine toutes les autres portant sur la compréhension scientifique du dioxyde de carbone[16]. »

Au début des années 2000, le physicien allemand Hans Joachim Schellnhuber et son compatriote professeur de changement global Hermann Held commencent à travailler sur l'idée de *tipping point*, sans mobiliser cette terminologie mais en identifiant les points de fragilité du système Terre du point de vue de son habitabilité[17]. Après avoir été un des auteurs principaux du troisième rapport du GIEC publié en 2001, Hans Joachim Schellnhuber utilisera l'expression *tipping points* de façon informelle pour expliquer à un journaliste de la BBC les ruptures non linéaires : « ce sont, plus ou moins, des *tipping points* ». Au même moment, l'idée de changements brusques donne son titre à un rapport de 200 pages dirigé par le géologue états-unien James W. C. White pour l'académie nationale des sciences des États-Unis en 2002, *Abrupt Impacts of Climate Change : Anticipating Surprises* (« Impacts brusques du changement climatique : Anticiper les surprises »). Il écrit : « Il est temps de prendre au sérieux la menace des points de basculement, afin de mieux anticiper les surprises inévitables et de s'y préparer[18]. »

L'année suivante, le géologue états-unien Richard B. Alley et ses collègues montrent que « des changements climatiques

importants, brusques et généralisés, aux conséquences majeures, se sont produits à plusieurs reprises dans le passé, lorsque le système Terre a été contraint de franchir des seuils ». S'ils ne mobilisent pas explicitement le terme « *tipping point* », c'est celui de « *bifurcation point* » qui apparaît dans cet important article publié dans *Science*, qui affirme alors qu'il « est concevable que l'action humaine sur le changement climatique augmente la probabilité d'événements importants et brusques[19] ». Dans les années 2004-2005, en plus de Hans Joachim Schellnhuber, d'autres personnalités scientifiques aux travaux fortement médiatisées comme Richard B. Alley et le climatologue états-unien James Hansen mobiliseront à plusieurs reprises le terme de *tipping point* de façon informelle pour souligner l'inadéquation des politiques publiques avec la réalité physique du système climatique[20].

En bref, la notion de *tipping point* dans le système climatique émerge pour médiatiser les préoccupations des scientifiques qui tentent d'interpeller la responsabilité des nations. Elle connaît ainsi une médiatisation avant même d'avoir une conceptualisation scientifique précise. Dès lors, il est difficile d'affirmer de façon simpliste la matérialité physique des *tipping points* sans avoir une analyse de ce qui prévaut à cette catégorisation : informer sur le risque, transmettre une inquiétude[21].

Développement scientifique et conceptualisation

Après les premiers usages informels du terme *tipping point* pour sensibiliser le large public aux changements brutaux dont est capable le système climatique, il n'apparaît dans les productions scientifiques sur le climat qu'en 2005 avec cet article de deux glaciologues de l'université de Washington, Ron W. Lindsay et Jinlun Zhang, portant sur la glace de mer arctique, « L'amincissement de la glace de mer arctique, 1988-2003 : Avons-nous

franchi un *tipping point*[22] ? ». Mais il n'est pas véritablement défini et conceptualisé. Comme l'a identifié le Canadien spécialiste en communication Chris Russill, *tipping point* est ici de toute évidence mobilisé pour sa puissance communicative et suggestive. La même année, une réunion est organisée à Oxford les 11 et 12 septembre dans le but de trouver des images pour évoquer au grand public les dangers du changement climatique. Des chercheurs se réunissent avec des artistes (scéniques, musicaux, plasticiens, romanciers…) et cherchent une « image mémorable » qui ferait date[23]. Une des icônes retenues est la « carte des *tipping points* » élaborée par le directeur de l'Institut de recherche sur l'impact climatique de Potsdam en Allemagne et directeur de recherche du Centre Tyndall pour la recherche sur le changement climatique à l'université d'East Anglia (Royaume-Uni), Hans Joachim Schellnhuber. Celle-ci représente les régions du monde où les systèmes écologiques et climatiques sont proches d'un point critique qui, s'il est franchi, est potentiellement irréversible. Ce meeting de septembre aboutit à une nouvelle réunion à l'ambassade britannique de Berlin les 5 et 6 octobre intitulée, cette fois-ci explicitement, « *Tipping points* dans le système Terre », et qui réunit 36 experts internationaux.

En 2005, James Hansen mobilise l'idée de *tipping point* lors d'une conférence à l'occasion d'un congrès de la puissante *American Geophysical Union* (AGU), évoquant les impacts du climat sur nos sociétés : « Je présente de nombreux éléments indiquant que le climat de la Terre est proche d'un *tipping point*, mais qu'il ne l'a pas encore franchi, au-delà duquel il sera impossible d'éviter les changements climatiques qui auront des conséquences indésirables de grande ampleur. » La question cruciale devient alors immédiatement : quel niveau de réchauffement provoquerait ces dégâts ? L'approche de James Hansen, scientifique brillant, n'est pas d'animer un débat sur les différentes

probabilités de franchissement d'un *tipping point* en fonction de la moyenne des températures terrestres, car cela détourne notre regard du véritable enjeu. L'heure n'est plus à chipoter, mais à agir. Le 26 mars 2006, Hansen est cité dans un article du *Times* qui titre « La Terre au point de bascule : le réchauffement climatique s'intensifie[24] ». La presse s'empare du sujet, pas encore les politiques.

En 2007, Timothy Lenton et Hans Joachim Schellnhuber, deux des chercheurs du système Terre ayant le plus travaillé à la popularisation de la notion de *tipping point*, publient ensemble un article dans le premier volume de *Nature Climate Change*, une revue qui se crée alors dans le sillage de *Nature* et deviendra vite une revue de référence en sciences du climat, intitulé « Faire pencher la balance » (« Tipping the scales[25] »). Ils explicitent un nécessaire basculement socio-économique pour éviter un basculement du système climatique ; le terme *tipping point* est alors mobilisé à neuf reprises. Les deux chercheurs encouragent une reconfiguration de la politique climatique à partir de la menace que représentent les *tipping points* pour les sociétés. Ils commencent alors à développer une conceptualisation biogéophysique qui a d'emblée un double objectif : produire un savoir singulier sur le système Terre, d'une part, et communiquer sur les risques auprès des décideurs politiques pour réorienter la trajectoire de nos sociétés.

Ce n'est qu'en 2008 que nous avons véritablement affaire à un article scientifique en bonne et due forme qui conceptualise les *tipping points*. Timothy Lenton, Hermann Held, Hans Joachim Schellnhuber et cinq autres collègues publient dans la prestigieuse revue *PNAS* : « Éléments de basculement dans le système climatique terrestre » (« Tipping elements in the Earth's climate system[26] »). Dans cet article de référence, point de départ d'une conceptualisation climatique de la notion de *tipping point*, on comprend que les impacts dangereux du

changement climatique pour les sociétés ne peuvent véritablement être compris qu'à partir du comportement non linéaire du système Terre. Si la température moyenne augmente de façon graduelle, ses conséquences sont non proportionnelles. Les paléoclimatologues qui étudient les évolutions climatiques passées le savent bien : il y a eu dans l'histoire de la Terre des changements brusques dont certains ont été irréversibles[27].

Le GIEC et la non-linéarité

Quelques années auparavant, en 2001, dans son troisième rapport, le GIEC avait introduit l'idée de « discontinuités futures à grande échelle[28] » ou de « risque de changements abrupts/non linéaires[29] » dans le fonctionnement du système climatique. Mais ces événements non proportionnels n'étaient considérés comme probables que dans l'hypothèse d'un réchauffement de +5 °C. Les savoirs scientifiques se sont affinés et dans les deux rapports publiés en 2018[30], ces discontinuités sont considérées comme probables même entre +1 °C et +2 °C[31]. Le sixième rapport publié en 2021-2022 évoque le terme de *tipping points* à 111 reprises dans le texte de 2 409 pages écrit par le premier groupe de travail, sur les données physiques[32]. Ce groupe de travail a identifié quinze éléments de basculement, dont la plupart sont marqués par la possibilité de franchissement de seuils irréversibles dans la biosphère, la cryosphère et les océans[33]. C'est le « changement brusque » (*abrupt change*) qui caractérise un *tipping point*, que le GIEC identifie comme « considérablement plus rapide que le taux de changement de l'histoire récente[34] ». Si le GIEC a tardé à mobiliser la notion de points de basculement, c'est lié à ses processus propres consistant dans la synthèse des données déjà publiées (le GIEC a donc mécaniquement un peu de retard sur le débat scientifique).

Globalement, si l'existence de *tipping points* dans le système Terre devient scientifiquement de plus en plus claire, le niveau de température globale moyenne permettant leur déclenchement comporte encore nombre d'incertitudes. De plus, si la caractéristique des *tipping points* du système Terre est d'entraîner dans leur sillage des *tipping points* sociétaux aux conséquences dramatiques (insécurité alimentaire, perte de territoires habitables, crises financières, etc.), nous ne pouvons pas identifier avec exactitude chacun des effets – les réactions des sociétés fournissant une large palette de réactions possibles (de la concurrence guerrière à la coopération pacifique). Au cœur de ces incertitudes, des chercheurs ont consacré toute leur énergie à modéliser les évolutions du climat comme des écosystèmes pour fournir aux sociétés des signaux d'alerte précoces permettant de « nous détourner du précipice[35] », *dixit* la chercheuse sud-américaine Reinette Biggs et ses collègues, nous qui sommes ni plus ni moins « au bord du gouffre[36] » selon une expression de trois grands écologues.

2023 : le premier rapport mondial

En 2023, Timothy Lenton coordonne un rapport de près de 500 pages, *Global Tipping Point Report*, qui propose un état du savoir et des lacunes sur les *tipping points* du système Terre[37]. Ce sont plus de 2 000 articles afférents aux processus non linéaires qui sont lus, analysés, discutés et synthétisés dans le cadre d'un travail d'équipe mobilisant 200 chercheurs. Le commanditaire de ce rapport, le Bezos Earth Fund, doté de 10 milliards de dollars par le fondateur d'Amazon Jeff a certainement été intéressé par l'attention des auteurs à des solutions et autres améliorations techniques possibles. La finalité, en plus de la réalisation d'une synthèse sur ce que nous savons et sur ce qu'il nous faut parvenir à savoir dans les années à

venir (parties 1 et 2 du rapport), est de développer une gouvernance mondiale consciente du fonctionnement du système Terre (partie 3) afin d'activer des *tipping points* économiques, techniques et sociétaux pour permettre à l'humanité de continuer sa recherche de prospérité (partie 4).

Les auteurs de cette étude proposent d'identifier des points de basculement positifs pour accélérer les transformations permettant de trouver une durabilité (ils prennent ici en exemple les investissements de plus en plus massifs dans les énergies renouvelables – en oubliant toutefois de préciser que leur développement ne s'est pas accompagné à ce jour d'une baisse des énergies fossiles). Mais ils espèrent que le déclenchement d'un *tipping point* positif permettra d'en déclencher d'autres, provoquant un effet domino de changements positifs. Le franchissement de plusieurs *tipping points* technologiques, économiques et sociétaux devra créer un contre-effet puissant pour ne pas risquer de voir les *tipping points* du système Terre échapper à tout contrôle.

Les *tipping points* et leur galaxie sémantique

Un petit peu de vocabulaire

Depuis l'article inaugural de 2008, la notion de *tipping point* s'est accompagnée d'un ensemble terminologique qui a transformé notre manière de parler du climat et de la Terre[38]. Imaginons un immense équilibre où un petit changement – ou une succession d'infimes altérations – peut déclencher une métamorphose. Le *tipping point* ou point de basculement est ce moment critique où, dans un système aux multiples interactions, un changement s'auto-entretient au-delà d'un seuil. Selon les caractéristiques du système et la dynamique engagée,

le système stable peut alors osciller doucement (la transition se fait alors de façon « lente »), ou il peut se déplacer sans discontinuer vers le nouvel état dans une bifurcation catastrophique.

Ce basculement a trois caractéristiques. (1) La soudaineté (à rapporter aux échelles temporelles des processus en vigueur) : il n'y a plus de retour en arrière possible mais les effets du franchissement ne sont pas nécessairement immédiatement perceptibles. La transition peut s'engager sur un temps long. C'est le cas du franchissement du *tipping point* de la fonte des calottes glaciaires. Une fois les calottes condamnées, leur fonte peut prendre des milliers d'années. (2) L'autoperpétuation : une fois enclenché, le changement continue sa course, même si le facteur initial disparaît. C'est comme une avalanche qui, une fois lancée, poursuit sa descente sans qu'on puisse l'arrêter. (3) L'irréversibilité : on ne peut pas revenir en arrière, ou de façon très difficile et sur des échelles temporelles très longues[39]. La quantité d'effort nécessaire pour restaurer l'équilibre initial dépasse de loin celle qui a déclenché le basculement.

Pour décrire les sous-systèmes du climat susceptibles de basculer, on utilise le terme « élément de basculement ». Des petites perturbations peuvent les commuter dans un nouvel état, qualitativement différent[40]. Ainsi l'effondrement des calottes glaciaires qui entraîne une forte élévation du niveau de la mer ; un dépérissement de la forêt amazonienne qui modifie le régime de précipitations ; ou encore un dégel du permafrost libérateur de carbone[41].

Le mécanisme est parfois comparé à un jeu de dominos. Un petit changement dans un élément peut en déclencher un autre dans un processus en cascade, aboutissant à un effet domino (ou cascade de basculements) sur l'ensemble du système. On distingue alors des boucles de rétroaction : la boucle positive amplifie le changement, tandis que la boucle négative cherche à le contenir. Mais le système Terre est aussi intrinsèquement

imprévisible. Sa nature stochastique – où le hasard joue un rôle non négligeable – signifie que la même perturbation peut engendrer des réactions très différentes selon le contexte. Prévoir un point de basculement est alors particulièrement complexe et caractérisé par des probabilités toujours imprécises[42]. Un autre aspect d'un système concerne ses états stables alternatifs, ou « attracteurs ». Dans cette situation, il peut avoir une hystérésis : son évolution n'est pas immédiate, il y a comme un retard de l'effet. Ce phénomène est notamment responsable de l'irréversibilité souvent observée dans les systèmes ayant dépassé leur seuil critique.

S'il est essentiel de comprendre le fonctionnement du système Terre et les processus de *tipping points*, il est important d'entretenir une relation non déterministe avec cette notion afin de ne pas sombrer dans des sentiments négatifs stériles d'inévitabilité, d'impuissance, et, *in fine*, de désespoir. Un point à avoir à l'esprit concernant les éléments de basculement à évolution lente (la fonte des calottes glaciaires est ici un élément typique) est qu'un seuil peut être temporairement dépassé sans provoquer de changement d'état de l'ensemble du système si le temps de dépassement est court (relativement à l'échelle de temps de l'effondrement de l'élément du système Terre)[43].

Un tipping point en image

Une balançoire en équilibre est une analogie possible pour comprendre la logique des points de basculement. Imaginons une de ces balançoires qu'on trouve sur une aire municipale de jeux, à côté d'une « araignée » ou d'une « pyramide ». Pas une balançoire qu'on a dans son jardin où un petit siège individuel est accroché à une structure en bois ou en métal par deux fils. Mais plutôt un de ces « tapeculs » avec une barre en métal horizontale qui dispose d'un pivot central et se termine

par un siège à chaque extrémité et où deux enfants peuvent s'asseoir.

Dans son état initial, la balançoire est stable, symbolisant un système en équilibre. Les forces de chaque côté se compensent, permettant au système de résister à de petites perturbations. À mesure que des poids sont ajoutés progressivement sur un côté, la balançoire commence à s'incliner légèrement. Ces poids représentent les perturbations ou pressions exercées sur le système, comme l'augmentation des gaz à effet de serre, la déforestation, l'anthropisation des sols, etc.

Tant que ces ajouts restent modérés, le système conserve sa résilience, bien qu'il devienne progressivement plus fragile. Mais un moment critique survient lorsque l'ajout d'un poids supplémentaire, même infime, provoque un basculement total de la balançoire. Ce basculement illustre un *tipping point*, où un changement mineur entraîne une transformation majeure et rapide. Ce comportement non linéaire diffère des premiers ajustements progressifs et marque une transition abrupte du système vers un nouvel état. Une fois dans cet état incliné, il devient plus difficile de revenir à la position initiale. Essayons de retirer le dernier poids positionné, la balance ne revient pas à l'équilibre.

Dans le contexte du climat, cette analogie est intéressante. Par exemple, l'accumulation progressive de gaz à effet de serre agit comme les poids ajoutés à la balançoire, créant une pression constante sur des systèmes naturels comme les calottes glaciaires ou les courants océaniques. Une fois un point de basculement atteint, les transformations, telles que la fonte irréversible des glaciers ou le ralentissement des courants océaniques, deviennent difficilement réversibles, entraînant des conséquences dramatiques et durables. Cette image souligne l'importance d'intervenir avant d'atteindre ces seuils critiques, car au-delà de ce point, les efforts pour stabiliser le système deviennent colossaux, voire impossibles.