



Enjeux de société

QUE SIGNIFIE « TROP TARD » POUR LE CLIMAT ?

Thierry Lefèvre

Professionnel de recherche à la Faculté de sciences et génie
et membre Des Universitaires
Université Laval

Adoptée en 1992, la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a entre autres comme objectif d'éviter « toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique » (Nations Unies, 1992). Pour informer décideur.euse.s et citoyen.ne.s de ces risques, des données aussi fiables que possible sont requises. Il faut donc quantifier les effets biogéophysiques que le réchauffement planétaire induit et induira, par exemple la montée du niveau des océans, et déterminer si certains phénomènes peuvent devenir irréversibles. Or, si les liens entre émissions de GES et réchauffement sont bien établis et les tendances globales bien connues, la variabilité naturelle du climat masque l'évolution des processus et limite les prévisions. D'autres incertitudes viennent d'un manque de connaissance détaillée des mécanismes biogéophysiques en cours et de la nécessité d'inclure dans les modèles divers scénarios hypothétiques d'émissions anthropiques.

Malgré les incertitudes et la complexité du système-Terre, les observations montrent des modifications progressives de certains processus planétaires comme la fonte de la banquise du Groenland. Des modèles suggèrent que ces processus pourraient devenir irréversibles ou s'emballer à partir de certains seuils critiques. Des scientifiques avancent que c'est le climat mondial lui-même qui pourrait changer radicalement et irréversiblement. Dans cet article, nous abordons ces risques et nous présentons les éléments de réponse à la question : est-il trop tard pour éviter des bouleversements climatiques ?

Processus planétaires et basculement

Le réchauffement des basses couches de l'atmosphère a diverses répercussions sur la circulation atmosphérique et océanique, sur la cryosphère et sur les biomes. On assiste ainsi à des modifications des régimes de précipitations, un déplacement vers le nord de la trajectoire des cyclones et un affaiblissement du courant dans l'Atlantique (IPCC, 2013). La cryosphère est soumise à un dégel progressif, notamment le pergélisol, les glaciers montagneux, la mer de glace Arctique, et les inlandsis (glaciers continentaux) de l'Ouest de l'Antarctique et du Groenland. Enfin, les écosystèmes et les espèces sont affectés par le réchauffement, en particulier les barrières de corail ou la forêt amazonienne ou boréale. On appellera *processus planétaires** les phénomènes à large échelle altérés par le réchauffement anthropique.

Prenons l'exemple de la circulation océanique dans l'Atlantique. Celui-ci est parcouru du sud au nord par un immense courant chaud de surface, qui plonge à des latitudes élevées où il s'enfonce dans les profondeurs, repart en sens inverse vers le sud, puis remonte dans l'hémisphère sud pour fermer une boucle appelée *circulation océanique thermohaline*. Dans sa portion méridionale, la stabilité de ce courant dépend fortement des froides températures nordiques et de la présence

d'une forte salinité qui rend l'eau plus dense et le fait s'enfoncer par gravité dans les fonds marins. Le terme *thermohaline* réfère à l'origine motrice du processus qui est dû à la température (*thermo*) et à la salinité (*haline*).

Ce processus est influencé par le réchauffement particulièrement prononcé des régions nordiques qui tend à l'affaiblir. Aussi, les déversements d'eau douce résultant de la fonte progressive de l'inlandsis du Groenland et de la mer Arctique « allègent » l'eau salée, réduisant davantage le flux d'eau océanique. La circulation en Atlantique méridional semble ainsi s'être affaiblie au cours du 20^e siècle et continuera de le faire au 21^e siècle si les émissions de GES se poursuivent (Steffen et al., 2018 ; IPCC, 2019). Ultimement, la circulation pourrait s'arrêter de manière abrupte, une éventualité néanmoins très improbable avant 2100.

L'exemple précédent montre que certains processus planétaires, représentés à la Figure 1, pourraient subir une transformation abrupte, ou *basculement**, à partir de certains niveaux de réchauffement. La température seuil à laquelle un tel changement se produirait correspond à un point de basculement. La fonte de l'inlandsis du Groenland et celle de l'Antarctique en sont des exemples. Bien que les basculements soient soutenus par des arguments théoriques et paléoclimatiques, ils demeurent incertains et font l'objet d'un faible consensus scientifique. Il s'agit d'enjeux à faible probabilité d'occurrence, mais à fort impact potentiel (Schneider, 2004).

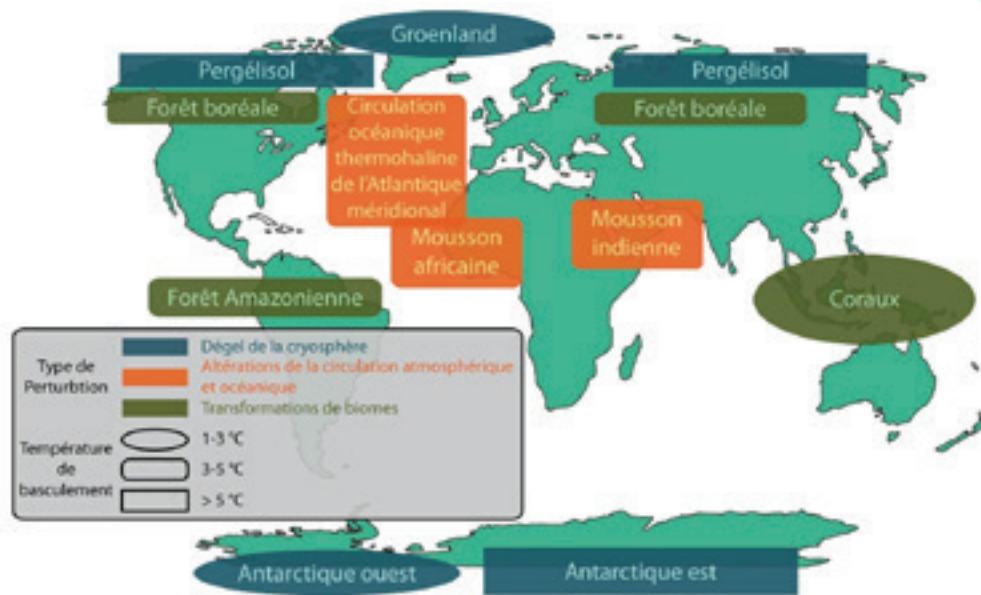


Figure 1. Présentation des processus planétaires affectés par le réchauffement mondial et susceptibles de basculer, classés selon le type de perturbation et la température de basculement. Adaptée de Carbon Brief, 2020 et Steffen et al., 2018

1. Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans un glossaire en fin d'article.

La Figure 2 schématise le mécanisme de basculement. La courbe bleue illustre le passage du processus de l'état initial à l'état final, par exemple la transformation de la banquise du Groenland en eau douce. Pour une faible perturbation, la courbe est peu inclinée, illustrant l'évolution graduelle du processus considéré avec la contrainte qui en est la cause (les GES). On dit que la réponse est *linéaire* avec la contrainte subie. Puis, au-delà d'un seuil (point de basculement), l'évolution du système n'est plus linéaire et passe abruptement de l'état initial à un état radicalement différent (état final).

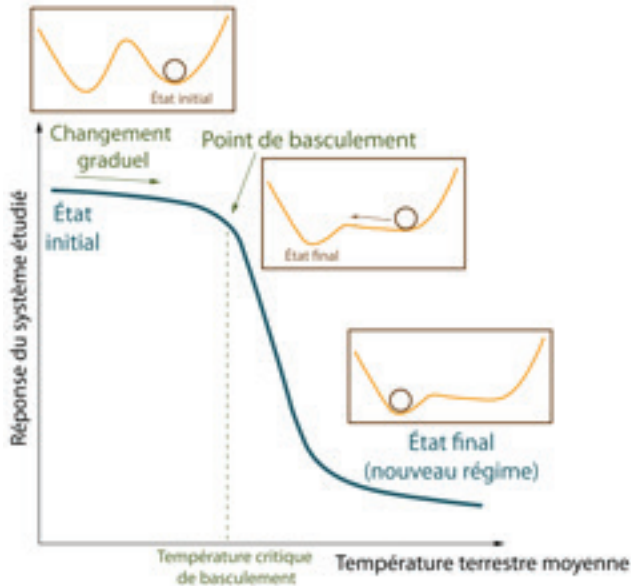


Figure 2. Schéma représentant le basculement d'un processus terrestre perturbé par le réchauffement planétaire. La courbe bleue représente le passage de l'état initial à l'état final. Les encadrés montrent la stabilité des états telle que symbolisée par la profondeur des puits, et la déstabilisation à l'approche du point de basculement (quasi absence de puit). Adapté de Lenton, 2011.

Considérons pour faire une analogie que notre processus climatique soit un canoë. Lorsqu'il flotte sur l'eau normalement, le canoë est dans l'état initial, qui est stable. Les vagues autour, si elles ne sont pas trop fortes, le perturbent peu. Ces vagues représentent la variabilité naturelle du climat. Si le canoë se penche sur le côté (l'équivalent des GES), il peut arriver un point où l'embarcation bascule (point de basculement) et se retourne (état final). Il est à noter que lorsque l'embarcation est penchée assez près du point de basculement, une vague, même légère, peut suffire à faire basculer l'embarcation, ce qui n'est pas le cas quand l'embarcation est bien à flot (état initial). Cette sensibilité aux variations naturelles s'applique aux éléments climatiques : une petite fluctuation climatique peut potentiellement induire une transformation abrupte d'un processus proche d'un point de basculement.

Considérons la forêt humide amazonienne (état initial). Celle-ci risque de s'assécher et ainsi se transformer en savane ou en forêt saisonnière (état final), un phénomène nommé *dépérissement de la forêt amazonienne* pouvant potentiellement libérer 25 milliards de tonnes de carbone (ou gigatonnes de carbone, GtC) à l'horizon 2100 (Steffen et al., 2018). À titre comparatif, les émissions annuelles mondiales étaient de 10 Gt en 2017 (Global Carbon Budget, 2020) et au total, 515 GtC ont été accumulées dans l'atmosphère entre 1870 et 2011 (IPCC, 2013). Cette transformation a deux causes : une diminution des précipitations résultant des changements climatiques, mais surtout la déforestation qui pourrait atteindre un seuil à partir duquel la forêt ne pourrait plus produire assez de précipitations pour s'auto-soutenir. Au rythme actuel, des chercheurs avancent que cette possibilité pourrait se concrétiser d'ici quelques décennies (Carbon Brief, 2020). Les mécanismes de basculement font donc parfois intervenir d'autres pressions humaines comme la destruction et la fragmentation des habitats ou la pollution.

Irréversibilité des modifications climatiques

En physique, un phénomène est *irréversible** s'il ne peut être renversé, par exemple l'air qui s'échappe d'un ballon de fête. Dans la nature, un phénomène bien connu pour son irréversibilité est l'extinction d'une espèce. Dans le domaine climatique, le fait d'atteindre un point de non-retour est considéré comme un phénomène irréversible, par exemple une température au-delà de laquelle la fonte complète de l'inlandsis du Groenland devient irréversible. L'irréversibilité peut aussi résulter du fait que le renversement d'un processus nécessite d'inverser la hausse de la température planétaire. Il existe même des cas où le renversement nécessiterait que l'inversion de la contrainte imposée (le réchauffement anthropique) soit de plus grande ampleur que celle qui a transformé le processus, un phénomène appelé *hystérésis**. Ce phénomène pourrait rendre impossible avant des millénaires le renversement d'un processus affecté par un mécanisme de basculement.

Alors que l'humanité ne parvient déjà pas à réduire ses émissions de GES, le renversement du réchauffement anthropique semble irréaliste sur un horizon civilisationnel. De ce point de vue donc, les processus déjà enclenchés s'avèrent irréversibles. Dans l'hypothèse d'un retrait total des GES, l'inertie du système-Terre est telle que ces retours hypothétiques pourraient s'étaler sur de plus ou moins longues périodes de temps selon les processus. Par exemple, la calotte arctique, qui pourrait être libre de glace l'été avant la fin du siècle (une chance sur 2 pour un réchauffement de 2 °C ; IPCC,

2018), pourrait se reformer en l'espace de quelques décennies. De son côté, le dépérissement de la forêt amazonienne pourrait prendre plusieurs siècles à se rétablir (IPCC, 2013).

Les délais suivant l'arrêt des émissions ou leur hypothétique retrait, de même que les phénomènes d'irréversibilité ou d'hystérésis, ont pour principale origine le fait que le climat forme un système dynamique, complexe et interconnecté dont les composantes (atmosphère, océans, cryosphère, végétation, sols) répondent sur différents horizons temporels aux perturbations subies. Le système climatique présente donc une grande inertie. Deux principaux phénomènes rendent les conséquences climatiques de l'action humaine irréversibles. D'une part, les océans constituent une masse d'eau considérable qui présente une grande inertie thermique : les échanges thermiques entre la surface et les fonds marins et entre les océans peuvent prendre des millénaires pour s'accomplir. D'autre part, les GES persistent une certaine période de temps dans l'atmosphère avant de disparaître dans des réactions chimiques. Selon les GES, cette persistance peut durer de quelques décennies à plusieurs siècles voire des millénaires. Le CO₂ est un cas particulier car il peut aussi être absorbé par divers puits de carbone tels que les océans et les plantes.

Même dans le cas d'un arrêt complet des émissions, le caractère réversible est loin d'être acquis. La température de la planète à long terme est déterminée par l'accumulation de GES dans l'atmosphère. Ainsi, si les émissions de GES s'arrêtaient du jour au lendemain, la température planétaire augmenterait encore, d'environ 0,6 °C en 2100 par rapport à 2000 (IPCC, 2013). Le cumul des émissions passées, actuelles et futures engagent et engageront le climat pour des siècles ou des millénaires.

Considérons la fonte de la banquise du Groenland et de l'Ouest antarctique qui forme deux processus contribuant à la hausse du niveau des océans. Ils représentent ensemble une hausse potentielle de 10 mètres des océans, un processus irréversible sur des millénaires. Selon certains modèles, la fonte complète du Groenland et de l'Ouest antarctique pourrait être scellée à partir d'une augmentation de température de ~1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle (Lenton et al., 2019). Or, si les émissions de GES se poursuivent au même rythme qu'actuellement, la hausse atteindra 1,5 °C en 2040 (IPCC, 2018). L'humanité est donc en passe de rater la cible de 1,5 °C en 2100 telle que préconisée par l'Accord de Paris et peut-être d'imposer à plusieurs générations de devoir vivre avec les conséquences majeures de submersions de certaines îles et zones côtières, d'inondations et d'érosion.

Rétroaction et vitesse d'évolution

Un basculement est souvent associé au déclenchement d'un phénomène de *rétroaction**. Une rétroaction est un mécanisme par lequel un processus s'auto-restreint (rétroaction négative) ou s'auto-amplifie (rétroaction positive). Les rétroactions négatives ont tendance à garder les processus dans des conditions stables. Par exemple, plus la glace est mince en Arctique à la fin de l'été, plus elle se reforme rapidement l'hiver, une rétroaction qui a tendance à limiter la fonte progressive de la mer de glace induite par le réchauffement mondial (IPCC, 2013).

Une rétroaction positive a tendance à accélérer l'évolution d'un processus. Par exemple, la mer de glace arctique est soumise à une autre rétroaction : la glace réfléchit presque tout le rayonnement du Soleil alors que la mer qui lui fait place le réfléchit très peu, et au contraire, l'absorbe fortement. Cette absorption se traduit par un réchauffement supplémentaire qui accélère la fonte de glace, qui à son tour accélère le réchauffement, etc. C'est une boucle de rétroaction.

La fonte rapide de la mer de glace, notamment une diminution considérable en 2007, avait conduit les scientifiques à proposer que ce processus était soumis à un mécanisme de basculement. Cependant, même si la fonte complète de la glace en été est inéluctable au rythme actuel, il semble que l'addition des rétroactions négatives et positives de l'Arctique fasse en sorte que cette disparition ne passera pas par un effondrement abrupt (IPCC, 2013).

La libération de GES par le dégel du pergélisol est une rétroaction positive bien connue pouvant potentiellement accélérer son propre dégel ainsi que le réchauffement mondial. Le pergélisol contient de la glace, de la matière organique accumulée sur des milliers d'années, et des microorganismes. Son dégel se traduit par la fusion de la glace et l'activation des microorganismes qui décomposent la matière organique. Cette biodégradation en présence ou en l'absence d'oxygène libère respectivement du CO₂ et du méthane. Ces deux gaz accentuent le réchauffement planétaire, qui à son tour accélère le dégel du pergélisol, qui accroît le réchauffement, et ainsi de suite, engendrant ainsi une rétroaction positive et possiblement une transition abrupte et irréversible des émissions de GES.

Selon les données actuelles, cette rétroaction a une contribution modérée en termes de GES devant les émissions anthropiques, et la gardera très certainement au cours du 21^e siècle. Un basculement n'est donc pas imminent, mais le phénomène s'accélère à mesure que la température planétaire augmente et pourrait basculer pour un réchauffement planétaire de 5 °C. Le dégel du pergélisol serait irréversible sur des millénaires et représente un potentiel de libération de dizaines de GtC (Steffen et al., 2018).

Un basculement peut être extrêmement rapide, comme on l'a vu pour la forêt amazonienne qui pourrait dépérir en quelques décennies seulement. Les phénomènes de basculement peuvent ainsi être décalés dans le temps et s'étaler sur de longues durées passé le seuil critique. Ainsi, le niveau de réchauffement anthropique influencera la vitesse de fusion de la masse de glace du Groenland et de l'Antarctique Ouest : pour une augmentation maximale de 1,5 °C, le processus pourrait s'étaler sur 10 000 ans, mais à 2 °C, cela pourrait prendre 1 000 ans (Lenton et al., 2019). Même si certains phénomènes deviennent irréversibles, il est donc possible d'en limiter la vitesse d'évolution et les impacts.

Changement de régime climatique

Le climat est un système complexe au sein duquel interagissent les océans, l'atmosphère, la cryosphère et la biosphère. L'évolution de certains processus planétaires peut en accélérer ou en activer d'autres. C'est ainsi que le réchauffement local arctique résultant de la fonte de la mer de glace contribue au dégel du pergélisol. Ce type d'interactions pourrait se transférer de processus en processus dans une cascade d'activations de basculements appelée *effet domino* (Steffen et al., 2018 ; Lenton et al., 2019). Alors que l'eau douce de la banquise groenlandaise et de la glace arctique affaiblit la circulation océanique de l'Atlantique, ce ralentissement pourrait à son tour contribuer à assécher l'Amazonie, faire fondre la banquise antarctique et déstabiliser la mousson de l'Ouest africain et de l'Asie du sud, notamment par l'augmentation des sécheresses (Lenton et al., 2019).

Même hypothétique, une cascade affectant divers processus avec un large potentiel d'émissions de GES ne peut être exclue. Alors que les scientifiques envisagent maintenant de possibles basculements à des seuils plus bas que ceux estimés antérieurement (Lenton et al.,

2019), soit dans l'intervalle 1-3 °C, la hausse actuelle de la température mondiale de ~1 °C les a conduits à émettre l'hypothèse que les GES avaient peut-être déjà modifié le régime climatique qui a régné durant la deuxième moitié du Quaternaire, incluant l'Holocène. Nous aurions ainsi peut-être placé la Terre sur une nouvelle trajectoire climatique qui la dirige vers un régime nommé « Terre-étuve » ou « planète-serre » (*hothouse Earth*) (Steffen et al., 2018) comme schématisé à la Figure 3. Cette possibilité demeure encore très hypothétique. Il n'y a pas de consensus sur la réalité d'un tel phénomène, mais le fait que son éventualité soit soutenue par plusieurs arguments d'ordre biogéophysique et paléoclimatique montre que le risque ne peut être éliminé.

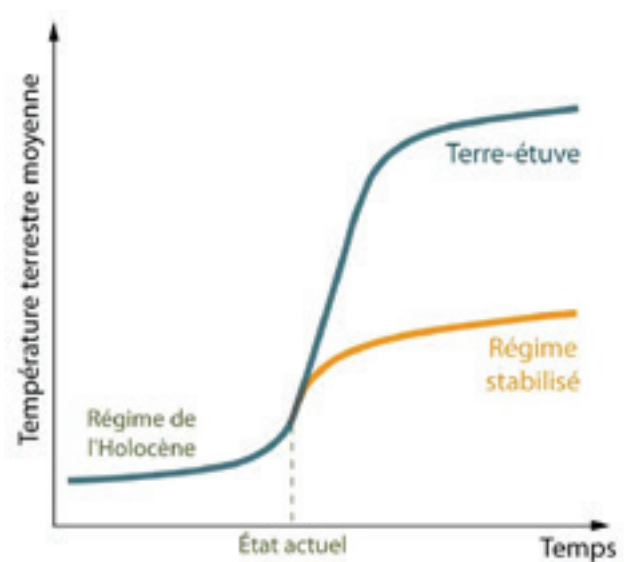


Figure 3. Schéma représentant un éventuel basculement climatique vers une « Terre-étuve » ou un régime « stabilisé ».

Le scénario du *statu quo* que suit l'humanité (*business as usual*) nous mène vers ce régime climatique chaud. Les scientifiques soutenant cette hypothèse pensent cependant que cette trajectoire climatique n'est pas inévitable et qu'avec une réduction radicale des émissions de GES, la Terre pourrait encore rejoindre un régime climatique stabilisé (Lenton et al., 2019) qui éviterait de grandes perturbations du climat et des sociétés humaines. Il ne serait donc probablement pas « trop tard » pour quitter cette trajectoire, mais rien n'est assuré. Devant les incertitudes scientifiques, une réponse sociétale urgente et d'envergure est nécessaire pour s'assurer de l'éviter.

Conclusion

Près de trente ans après la ratification de la CCNUCC et après cinq rapports du GIEC, force est de constater que l'humanité a fait très peu pour limiter ses émissions de GES. Avec les niveaux actuels, la civilisation s'achemine vers une augmentation de la température planétaire de 4-5 °C en 2100. Les effets des changements climatiques se font déjà sentir (canicules, sécheresses, érosion des côtes, ouragans), et bien que le déclenchement de basculements soit incertain, les risques qu'ils représentent ne peuvent être esquivés. Les changements sociétaux à accomplir pour réduire cette menace et ses répercussions sont énormes. La fenêtre pour réussir se referme toujours plus, mais la suite nous appartient probablement encore, au moins partiellement.

RÉFÉRENCES

Carbon Brief. (2020) Explainer: Nine 'tipping points' that could be triggered by climate change. Repéré à <https://www.carbonbrief.org/explainer-nine-tipping-points-that-could-be-triggered-by-climate-change>

Global Carbon Budget. (2020). Fossils fuels emissions. Repéré à <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press.

IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Repéré à <https://www.ipcc.ch/sr15/download/>

IPCC. (2019). Extremes, abrupt changes and Managing Risk (chapitre 6). Dans H.-O. Pörtner et coll. (dir.) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Repéré à <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-6/>

Nations Unies. (1992). *Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*. Article 2. Repéré à <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>

Lenton, T.M. (2011). Early warning of climate tipping points. *Nature Climate Change*, 1, 201-209.

Lenton, T.M. et al. (2019). Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature*, 575 (7784), 592-595. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31776487/>

Schneider, S.H. (2004) Abrupt non-linear climate change, irreversibility and surprise. *Global Environmental Change*, 14, 245-258

Steffen, W. et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 115(33), 8252-8259. <https://www.pnas.org/content/115/33/8252>

GLOSSAIRE

Basculement

Transformation abrupte d'un processus planétaire*, le faisant passer d'un régime de fonctionnement, ou état, à un autre. Ce mécanisme peut aussi s'appliquer au climat lui-même. Le point de basculement correspond à la température planétaire à partir de laquelle se produit une transformation abrupte. Le phénomène de basculement est souvent lié au déclenchement d'une boucle de rétroaction*. Les principaux processus planétaires susceptibles de suivre un mécanisme de basculement sont représentés à la Figure 1.

Hystérésis

Caractère partiellement irréversible* d'une transformation dont l'inversion nécessite que la contrainte qui l'a causée soit renversée avec une plus grande ampleur que celle qui a permis la transformation.

Irréversible

1) Se dit d'un phénomène qui ne peut être renversé.

En termes climatiques, la réversibilité sous-tend qu'une transformation induite par le réchauffement anthropique puisse être inversée par une diminution de la température planétaire. Un tel scénario semblait irréaliste pour notre civilisation, la majorité des processus planétaires transformés par le réchauffement anthropique semblent irréversibles à l'échelle de temps de notre civilisation.

2) Se dit d'un phénomène qui est irréversible (qui atteint un point de non-retour).

Certains phénomènes pourraient ne plus pouvoir être arrêtés à partir d'un certain niveau de réchauffement planétaire, par exemple la fonte de la banquise. Du fait de l'inertie climatique, même si l'humanité arrêta du jour au lendemain ses émissions de GES, la température augmenterait encore un peu, rendant certains processus potentiellement irréversibles.

Processus planétaire

Phénomène ou système naturel d'ampleur régionale ou continentale qui est transformé ou déclenché par le réchauffement anthropique. Citons par exemple les régimes de précipitations, les courants atmosphériques et océaniques, les barrières de corail, la forêt amazonienne ou boréale, et le dégel du pergélisol, des glaciers montagneux, de la mer de glace Arctique, et des inlandsis de l'Ouest de l'Antarctique et du Groenland.

Rétroaction ou boucle de rétroaction

Mécanisme par lequel un processus a tendance à s'auto-atténuer (rétroaction négative) ou s'auto-amplifier (rétroaction positive). Dans une rétroaction négative, la réponse du processus atténue la contrainte qui en est la cause, ce qui a tendance à garder le processus à l'équilibre. Dans une rétroaction positive, la réponse du processus amplifie la contrainte qui en est la cause, ce qui a tendance à accélérer l'évolution du processus.