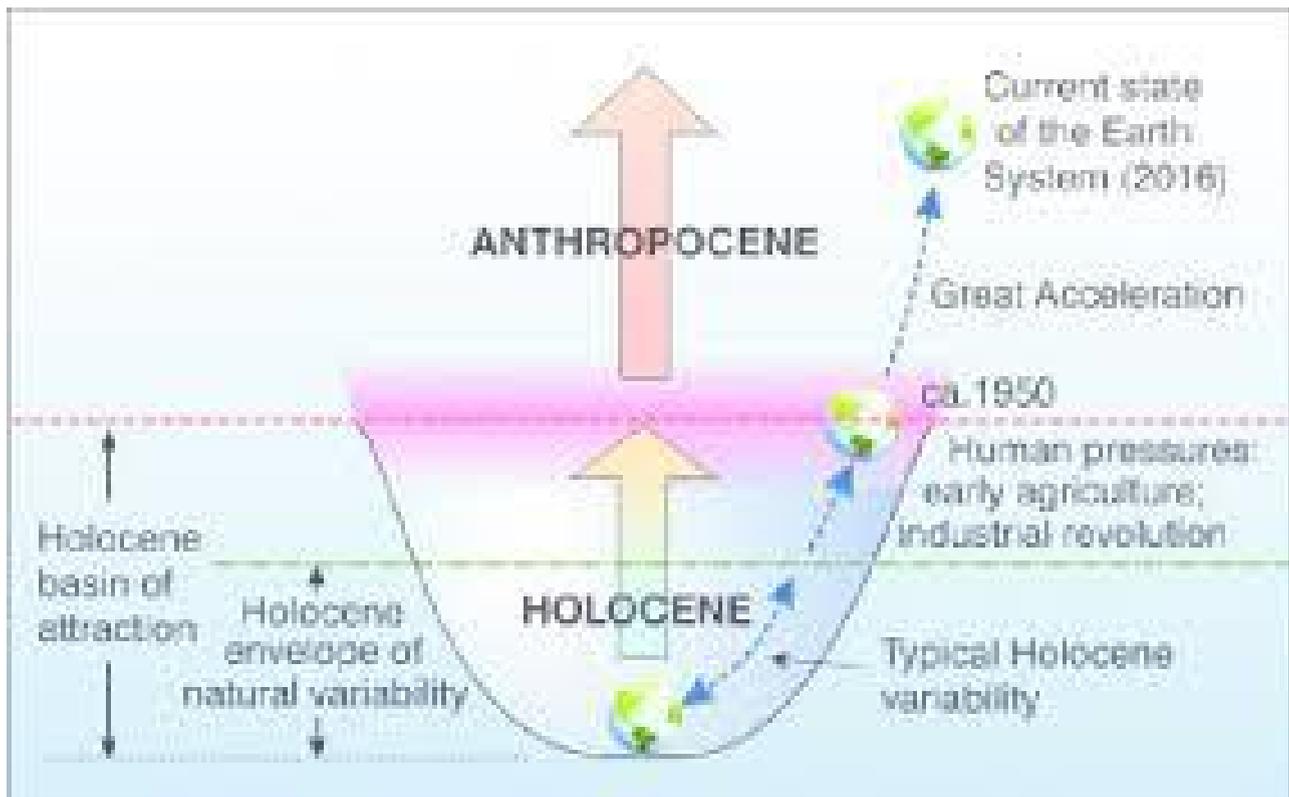




# Trajectories of the Earth System in the Anthropocene

## Trajectoires du système terre dans l'anthropocène



Will Steffen, Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann, and Hans Joachim Schellnhuber. Proceedings of the National Academy of Science of the United States PNAS August 6, 2018. 201810141; published ahead of print August 6, 2018.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>

Edited by William C. Clark, Harvard University, Cambridge, MA, and approved July 6, 2018 (received for review June 19, 2018)

Traduction française par [Gérard Schumacher](#) directeur de recherches au CNRS

[Références bibliographiques: édition auteurs, :](#)

## Résumé

Nous explorons le risque que des rétroactions auto-renforcées puissent pousser le système terrestre vers un seuil planétaire qui, s'il est franchi, pourrait empêcher la stabilisation du climat à des températures intermédiaires et provoquer un réchauffement continu sur un scénario de "Fournaise Terrestre" alors même que les émissions humaines sont réduites. Le

franchissement du seuil conduirait à une température moyenne mondiale beaucoup plus élevée que n'importe quel âge interglaciaire au cours des 1,2 million d'années passées et à des niveaux de la mer sensiblement plus élevés qu'à n'importe quel moment de l'Holocène. Nous examinons les preuves qu'un tel seuil pourrait exister et où il pourrait se trouver. Si le seuil est franchi, la trajectoire qui en résulterait causerait probablement de graves perturbations des écosystèmes, de la société et de l'économie. Une action humaine collective est nécessaire pour éloigner le système terrestre d'un seuil potentiel et le stabiliser dans un état habitable de type interglaciaire. Une telle action implique la gestion de l'ensemble du système terrestre - la biosphère, le climat et les sociétés - et pourrait inclure la décarbonisation de l'économie mondiale, l'amélioration des puits de carbone de la biosphère, des changements de comportement, des innovations technologiques, de nouveaux accords entre gouvernements et des valeurs sociales transformées.

Une nouvelle époque géologique est proposée (1) appelée Anthropocène, qui est basée sur l'observation que les impacts humains sur les processus planétaires essentiels sont devenus si profonds (2) qu'ils ont chassé la Terre de l'époque holocène dans laquelle l'agriculture, les communautés sédentaires et, finalement, les sociétés humaines socialement et technologiquement complexes se sont développées. La formalisation de l'anthropocène en tant que nouvelle époque géologique est envisagée par la communauté stratigraphique (3), mais quel que soit le résultat de ce processus, il devient évident que les conditions anthropocènes transgressent les conditions holocènes à plusieurs égards (2). Le fait de savoir que l'activité humaine rivalise maintenant avec les forces géologiques en influençant la trajectoire du système terrestre a des implications importantes pour la science du système terrestre et la prise de décision sociétale. Tout en reconnaissant que différentes sociétés dans le monde ont contribué différemment et de manière inégale aux pressions exercées sur le système terrestre et auront des capacités variées pour modifier les trajectoires futures (4), la somme totale des impacts humains sur le système doit être prise en compte pour analyser les trajectoires futures du système terrestre.

Dans cet article nous explorons les trajectoires futures potentielles du système terrestre en répondant aux questions suivantes.

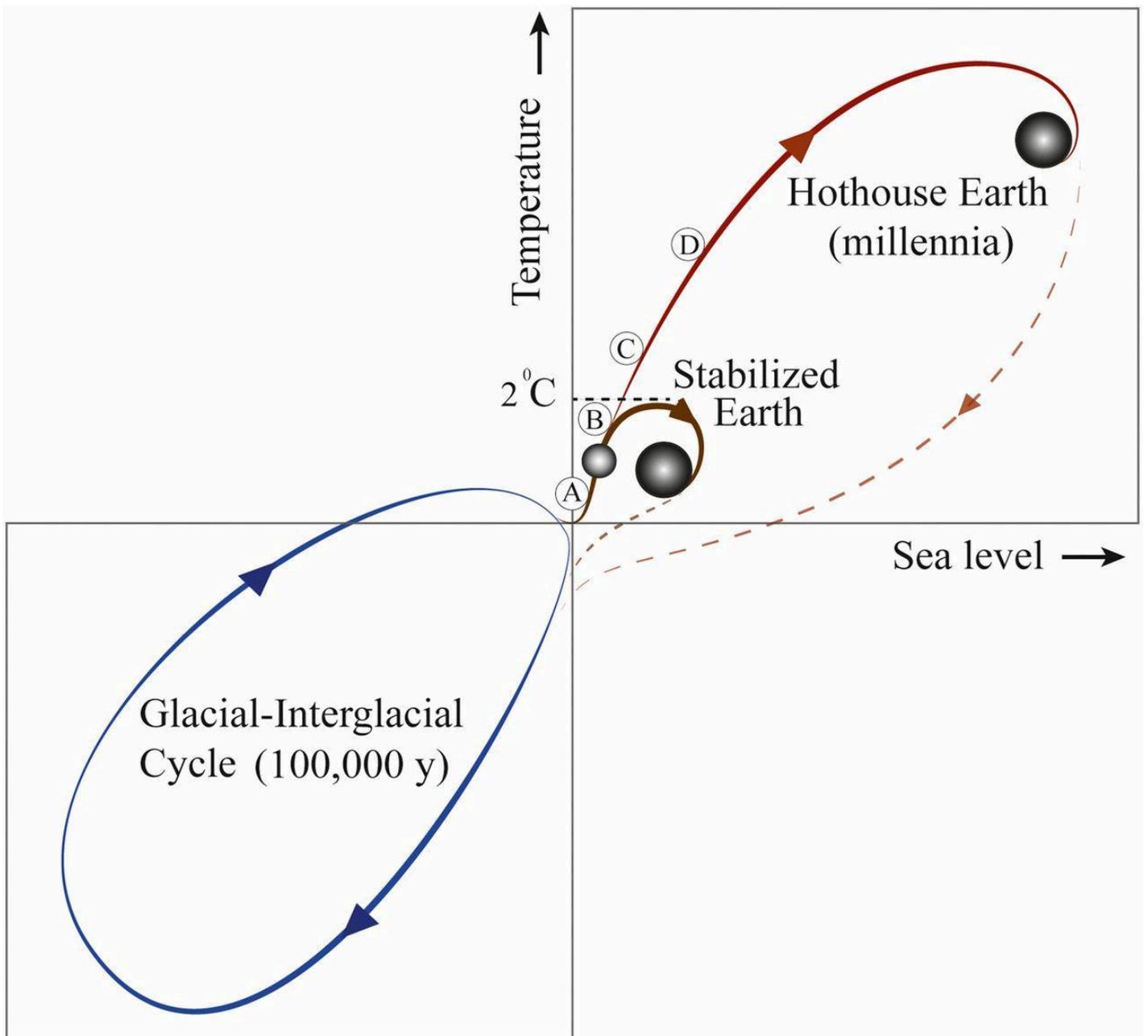
- Existe-t-il un seuil planétaire dans la trajectoire du système terrestre qui, s'il est franchi, pourrait empêcher la stabilisation dans une gamme de hausses de température intermédiaire ?
- Compte tenu de notre compréhension des rétroactions géophysiques et biosphériques intrinsèques au système terrestre, où pourrait se situer un tel seuil ?
- Si un seuil est franchi, quelles sont les implications, en particulier pour le bien-être des sociétés humaines ?
- Quelles actions humaines pourraient créer une voie qui éloignerait le système terrestre du seuil potentiel et l'orienterait vers le maintien de conditions interglaciaires ?

Pour répondre à ces questions, il faut une intégration profonde des connaissances de la science biogéophysique du système terrestre avec celles des sciences sociales et humaines sur le développement et le fonctionnement des sociétés humaines (5). L'intégration des connaissances requises peut s'avérer difficile, surtout si l'on tient compte de la grande diversité des échelles de temps. De plus en plus, les concepts issus de l'analyse de systèmes complexes fournissent un cadre qui réunit les divers champs d'investigation pertinents pour l'anthropocène (6). La dynamique du système terrestre peut être décrite, étudiée et comprise en termes de trajectoires entre des états alternatifs séparés par des seuils contrôlés par des processus non linéaires, des interactions et des rétroactions. Sur la base de ce cadre, nous soutenons que les tendances et les décisions sociales et technologiques qui se produiront au cours des dix ou vingt prochaines années pourraient influencer de manière significative la trajectoire du système terrestre pendant des dizaines, voire à des centaines de milliers d'années et potentiellement mener à des conditions qui ressemblent à des états planétaires qui ont été vus pour la dernière fois il y a plusieurs millions d'années, conditions qui seraient inhospitalières pour les sociétés humaines actuelles et pour de nombreuses autres espèces contemporaines.

## Risque d'un scénario de « Fournaise Terrestre »

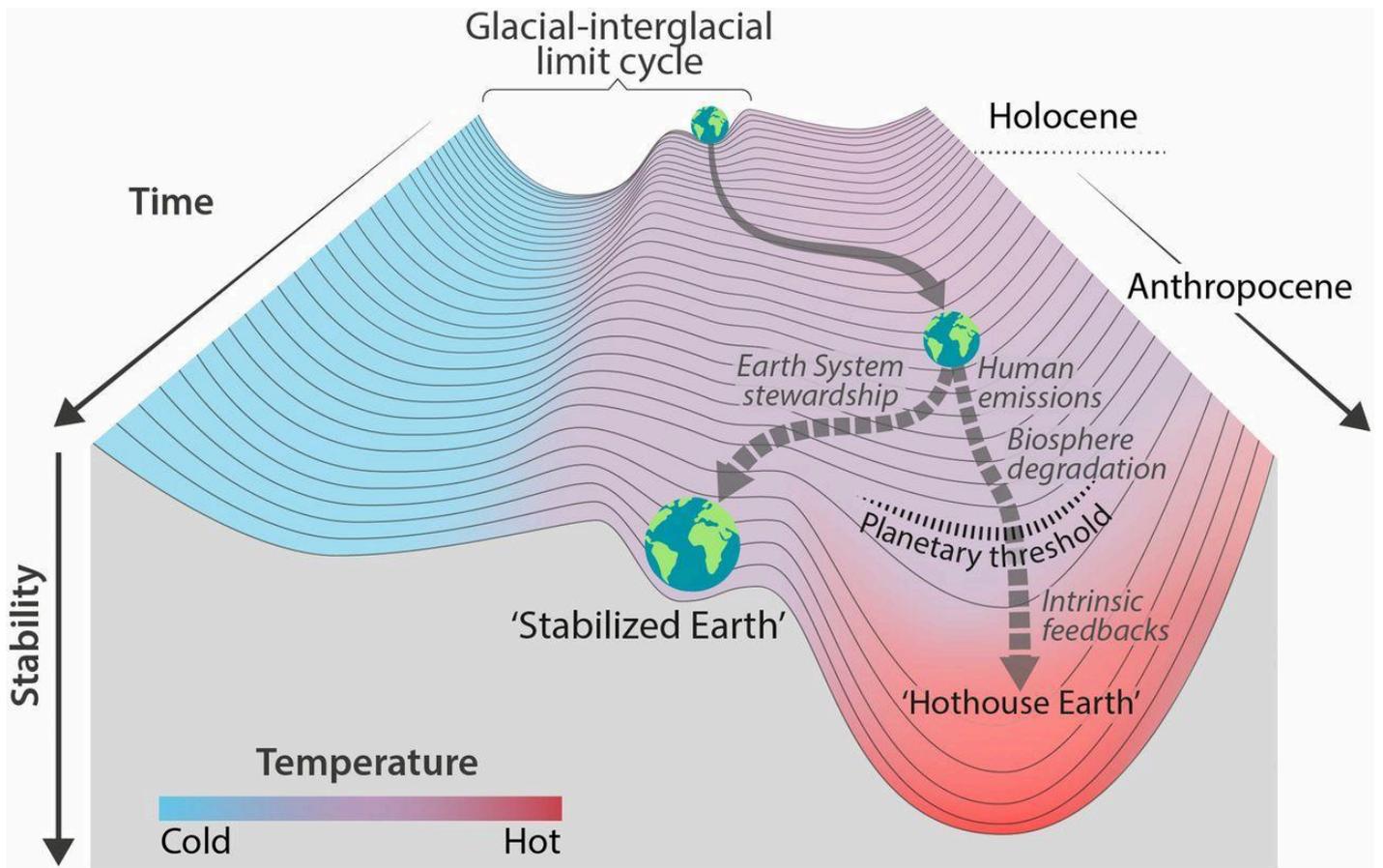
### **Cycles limites et seuils planétaires.**

La trajectoire du système terrestre à travers le Quaternaire supérieur, en particulier l'Holocène, fournit le contexte pour explorer les changements d'origine humaine de l'anthropocène et les trajectoires futures du système (l'annexe SI est plus détaillée). La figure 1 montre une représentation simplifiée de la dynamique complexe du système terrestre, où le système climatique physique est soumis aux effets des changements lents de l'orbite et de l'inclinaison de la Terre. Au cours du Quaternaire tardif (1,2 million d'années), le système est demeuré limité entre les extrêmes glaciaires et interglaciaires. Tous les cycles glaciaires et interglaciaires du dernier million d'années ne suivent pas exactement la même trajectoire (7), mais les cycles suivent la même trajectoire globale (un terme que nous utilisons pour désigner une famille de trajectoires largement similaires). Les états glaciaires et interglaciaires complets et les oscillations de environ 100 000 ans entre eux dans le Quaternaire tardif constituent des cycles limites (techniquement, la dynamique asymptotique des périodes glaciaires est mieux modélisée en tant qu'attracteurs de retrait dans un système dynamique non autonome). Ce cycle limite est représenté de façon schématique en bleu sur la Fig. 1, en bas à gauche en utilisant la température et le niveau de la mer comme axes. L'Holocène est représenté par le haut de la boucle de cycle limite près de l'étiquette A.



**Figure 1** Illustration schématique des trajectoires futures possibles du climat par rapport à l'arrière-plan des cycles glaciaires-interglaciaires typiques (en bas à gauche). L'état interglaciaire du système terrestre est au sommet du cycle glaciaire-interglaciaire, tandis que l'état glaciaire est au bas. Le niveau de la mer suit les changements de température relativement lentement grâce à l'expansion thermique et à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. La ligne horizontale au milieu de la figure représente le niveau de température préindustrielle, et la position actuelle du système terrestre est indiquée par la petite sphère sur la ligne rouge près de la divergence entre la trajectoire de la Terre stabilisée et celle de la « Fournaise Terrestre ». Le seuil planétaire proposé à  $\sim 2^{\circ}\text{C}$  au-dessus du niveau préindustriel est également indiqué. Les lettres le long des trajectoires Terre stabilisée/Terre de serre représentent quatre périodes du passé récent de la Terre qui peuvent donner un aperçu des positions le long de ces trajectoires (Annexe du SI) : A, Mid-Holocène ; B, Eemian ; C, Mid-Pliocène ; et D, Mid-Miocène. Leur position sur la courbe n'est qu'approximative. Leurs plages de température par rapport à l'époque préindustrielle sont données dans l'appendice SI, tableau S1.

La position actuelle du système terrestre dans l'anthropocène est représentée sur la figure 1, en haut à droite par la petite boule sur la trajectoire qui s'éloigne du cycle de la limite glacio-interglaciaire. Dans la Fig. 2, un diagramme de stabilité du processus, la position actuelle du système terrestre est représentée par le globe terrestre à l'extrémité de la flèche pleine dans le bassin d'attraction Anthropocène de plus en plus profond.



**Figure 2** Diagramme de stabilité montrant la trajectoire du système terrestre hors de l'Holocène et donc hors du cycle glacio-interglaciaire jusqu'à sa position actuelle dans l'Anthropocène plus chaud. La bifurcation de la figure 1 est représentée ici comme les deux voies divergentes du système terrestre à l'avenir (flèches pointillées). Actuellement, le système terrestre se trouve sur une trajectoire de « Fournaise Terrestre » entraînée par les émissions humaines de gaz à effet de serre et la dégradation de la biosphère vers un seuil planétaire à  $\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ligne horizontale discontinue à  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  sur la figure 1), au-delà de laquelle le système suit une trajectoire essentiellement irréversible entraînée par des rétroactions biogéophysiques intrinsèques. L'autre voie mène à la Terre stabilisée, une voie de gestion écologique du système terrestre guidée par les rétroactions créées par l'homme vers un bassin d'attraction quasi-stable et entretenu par l'homme. "La " stabilité " (axe vertical) est définie ici comme l'inverse de l'énergie potentielle du système. Les systèmes à l'état très stable (vallée profonde) ont un faible potentiel énergétique, et une énergie considérable est nécessaire pour les faire sortir de cet état stable. Les systèmes dans un état instable (en haut

d'une colline) ont une énergie potentielle élevée, et ils n'ont besoin que d'un peu d'énergie supplémentaire pour les pousser hors de la colline et vers une vallée d'énergie potentielle plus basse.

L'anthropocène représente le début d'une trajectoire humaine très rapide du système terrestre qui s'éloigne du cycle glaciaire-interglaciaire limite vers de nouvelles conditions climatiques plus chaudes et une biosphère profondément différente (2, 8, 9) (Annexe du SI). La position actuelle, à plus de 1 °C au-dessus du niveau de référence préindustriel (10), se rapproche de l'enveloppe supérieure des conditions interglaciaires depuis 1,2 million d'années (annexe du SI, tableau S1). Plus important encore, la trajectoire rapide du système climatique au cours du dernier demi-siècle, ainsi que le verrouillage technologique et l'inertie socio-économique des systèmes humains engagent le système climatique dans des conditions dépassant l'enveloppe des conditions interglaciaires passées. Nous suggérons donc que le système terrestre a peut-être déjà franchi une " bifurcation " des voies potentielles, une bifurcation (près de A dans la figure 1) qui retire le système terrestre du prochain cycle de glaciation (11). Dans l'avenir, le système terrestre pourrait potentiellement suivre de nombreuses trajectoires (12, 13), souvent représentées par la large gamme d'élévations de température globale simulée par les modèles climatiques (14). Dans la plupart des analyses, ces trajectoires sont largement déterminées par la quantité de gaz à effet de serre que les activités humaines ont déjà émis et continueront d'émettre dans l'atmosphère pendant le reste du siècle et au-delà - avec une relation quasi linéaire présumée entre les émissions cumulatives de dioxyde de carbone et l'augmentation de la température mondiale (14). Cependant, nous suggérons ici que les processus de rétroaction biogéophysique au sein du système terrestre, associés à la dégradation directe de la biosphère par l'homme, peuvent jouer un rôle plus important que prévu, limitant la gamme des trajectoires futures potentielles et éliminant potentiellement la possibilité de trajectoires intermédiaires. Nous soutenons qu'il existe un risque important que ces dynamiques internes, en particulier les fortes non-linéarités dans les processus de rétroaction, puissent devenir un facteur important ou peut-être même dominant dans le pilotage de la trajectoire que le système terrestre suit réellement au cours des siècles à venir. Ce risque est représenté dans les Fig. 1 et 2 par un seuil planétaire (ligne horizontale discontinue dans la Fig. 1 sur la trajectoire « Fournaise Terrestre » autour de 2 °C au-dessus de la température préindustrielle). Au-delà de ce seuil, les rétroactions biogéophysiques intrinsèques dans le système terrestre pourraient devenir les processus dominants contrôlant la trajectoire du système. L'emplacement exact d'un seuil planétaire potentiel est incertain (15, 16). Nous suggérons 2 °C en raison du risque qu'un réchauffement de 2 °C puisse activer d'importants éléments de basculement (12, 17), augmentant encore la température pour activer d'autres éléments de basculement dans une cascade de type domino qui pourrait amener le système terrestre à des températures encore plus élevées (Cascades de basculement). Ces cascades comprennent, pour l'essentiel, le processus dynamique qui conduit à des seuils dans les systèmes complexes (section 4.2 de la réf. 18).

Cette analyse implique que, même si l'objectif de l'Accord de Paris d'une augmentation de la température de 1,5 °C à 2,0 °C est atteint, on ne peut exclure le risque qu'une cascade de rétroactions puisse pousser irréversiblement le système terrestre sur un scénario "Fournaise terrestre". Le défi auquel l'humanité est confrontée est de créer un scénario "Terre stabilisée" qui éloigne le système terrestre de sa trajectoire actuelle vers le seuil au-delà duquel se trouve la « Fournaise Terrestre » (Fig. 2). La voie de la Terre stabilisée créée par l'homme mène à un bassin d'attraction qui n'est pas susceptible d'exister dans le diagramme de stabilité du système terrestre sans l'action humaine pour le créer et le maintenir. La création d'une telle voie et d'un tel bassin d'attraction nécessite un changement fondamental dans le rôle de l'homme sur la planète. Ce rôle d'intendance exige une action délibérée et soutenue pour devenir une partie intégrante et adaptative de la dynamique du système terrestre, créant des rétroactions qui maintiennent le système sur une trajectoire stabilisée de la terre (trajectoire alternative stabilisée stabilisée).

Nous explorons maintenant cette question critique plus en détail en considérant les rétroactions biogéophysiques pertinentes et le risque de cascades de basculement.

### **Rétroactions biogéophysiques.**

La trajectoire du système terrestre est influencée par les rétroactions biogéophysiques à l'intérieur du système qui peuvent le maintenir dans un état donné (rétroactions négatives) et celles qui peuvent amplifier une perturbation et entraîner une transition vers un état différent (rétroactions positives). Certaines des principales rétroactions négatives qui pourraient maintenir le système terrestre dans des conditions holocène - notamment l'absorption du carbone par les systèmes terrestres et océaniques - s'affaiblissent par rapport au forçage humain (19), ce qui augmente le risque que les rétroactions positives puissent jouer un rôle important dans la détermination de la trajectoire du système terrestre. Le tableau 1 résume les rétroactions du cycle du carbone qui pourraient accélérer le réchauffement, tandis que le tableau S2 de l'annexe du SI décrit en détail un ensemble plus complet de rétroactions biogéophysiques qui peuvent être déclenchées par des niveaux de forçage susceptibles d'être atteints dans le reste du siècle.

**Table 1.**

Carbon cycle feedbacks in the Earth System that could accelerate global warming

Feedback	Strength of feedback by 2100, * °C	Refs. (SI Appendix, Table S2 has more details)
Permafrost thawing	0.09 (0.04-0.16)	20-23
Relative weakening of land and ocean physiological C sinks	0.25 (0.13-0.37)	24
Increased bacterial respiration in the ocean	0.02	25, 26
Amazon forest dieback	0.05 (0.03-0.11)	27
Boreal forest dieback	0.06 (0.02-0.10)	28
Total	0.47 (0.24-0.66)	

- The strength of the feedback is estimated at 2100 for an ~2 °C warming.
- \* The additional temperature rise (degrees Celsius) by 2100 arising from the feedback.

La plupart des rétroactions peuvent montrer à la fois des réponses continues et un comportement de point de basculement dans lequel le processus de rétroaction devient auto-entretenu après le franchissement d'un seuil critique. Les sous-systèmes présentant ce comportement sont souvent appelés "éléments de basculement" (17). Le type de comportement - réponse continue ou point de basculement / changement interrompu - peut dépendre de l'ampleur ou de la vitesse de forçage, ou des deux. De nombreuses rétroactions indiquent un changement graduel avant que le point de basculement ne soit atteint. Quelques-uns des changements associés aux rétroactions sont réversibles sur de courtes périodes de 50 à 100 ans (p. ex. changement de l'étendue de la glace de mer arctique avec un réchauffement ou un refroidissement du climat ; la glace de mer Antarctique peut être moins réversible en raison de l'accumulation de chaleur dans l'océan Austral), mais la plupart des changements sont largement irréversibles sur des périodes qui importent aux sociétés contemporaines (p. ex. perte de carbone permafrost). Quelques-unes des rétroactions n'ont pas de seuils apparents (p. ex. changement dans les puits de carbone physiologiques terrestres et océaniques, comme l'augmentation de l'absorption de carbone en raison de l'effet de fertilisation au CO<sub>2</sub> ou la diminution de l'absorption en raison d'une diminution des

précipitations). Pour certains des éléments de basculement, le franchissement du point de basculement pourrait déclencher une réaction brusque et non linéaire (par exemple, la conversion de vastes zones de la forêt amazonienne en savane ou en forêt sèche saisonnière), tandis que pour d'autres, le franchissement du point de basculement conduirait à une réaction plus graduelle mais auto-entretenu (perte à grande échelle du permafrost). Il pourrait également y avoir des retards considérables après le franchissement d'un seuil, en particulier pour les éléments de basculement qui impliquent la fonte de grandes masses de glace. Toutefois, dans certains cas, la perte de glace peut être très rapide lorsqu'elle se produit sous forme d'éclosion massive d'iceberg (p. ex., événements Heinrich).

Pour certains processus de rétroaction, l'ampleur et même l'orientation dépendent du taux de changement climatique. Si le taux de changement climatique est faible, le changement dans les biomes peut suivre l'évolution de la température et de l'humidité, et les biomes peuvent se déplacer graduellement, absorbant potentiellement le carbone de l'atmosphère à mesure que le climat se réchauffe et que la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> augmente. Cependant, si le taux de changement climatique est trop important ou trop rapide, un point de basculement peut être franchi et un changement rapide du biome peut se produire par le biais de perturbations importantes (p. ex. incendies de forêt, attaques d'insectes, sécheresses) qui peuvent enlever abruptement un biome existant. Dans certains cas terrestres, comme les feux de forêt, il pourrait y avoir une impulsion de carbone dans l'atmosphère qui, si elle est suffisamment grande, pourrait influencer la trajectoire du système terrestre (29).

La variation des taux de réponse à un climat changeant pourrait conduire à une dynamique complexe de la biosphère avec des implications pour les processus de rétroaction. Par exemple, des retards dans le dégel du permafrost retarderaient très probablement la migration prévue vers le nord des forêts boréales (30), tandis que le réchauffement des zones méridionales de ces forêts pourrait entraîner leur conversion en prairies steppiques dont la capacité de stockage du carbone est beaucoup plus faible. Le résultat global serait une rétroaction positive pour le système climatique.

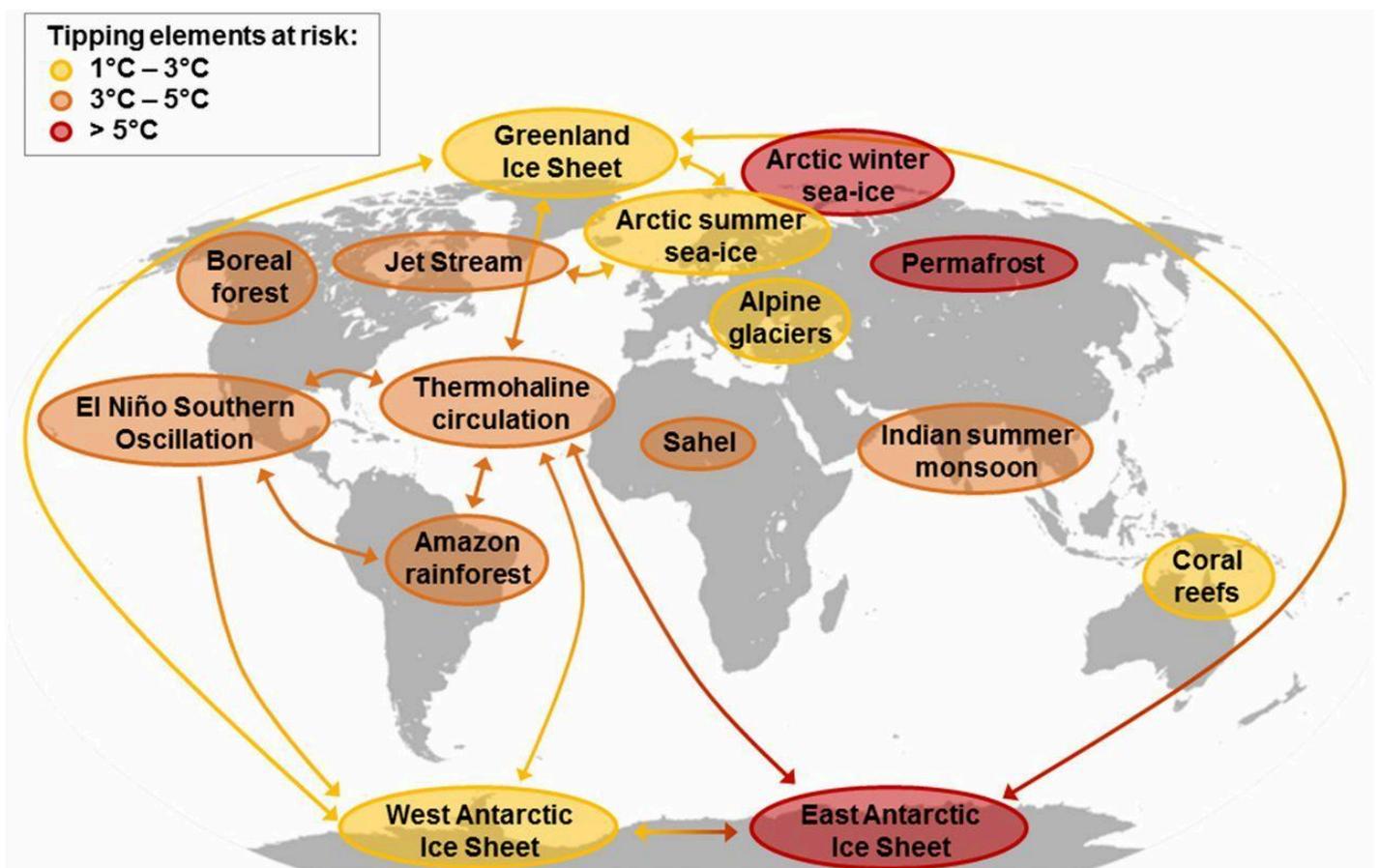
Le prétendu "verdissement" de la planète, provoqué par la croissance accrue des plantes due à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (31), a augmenté le puits de carbone terrestre au cours des dernières décennies (32). Cependant, l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique augmente la température, et les feuilles plus chaudes photosynthétisent moins bien. D'autres rétroactions sont également impliquées - par exemple, le réchauffement du sol augmente la respiration microbienne, libérant du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Notre analyse se concentre sur la force de la rétroaction d'ici 2100. Cependant, plusieurs des rétroactions qui montrent une magnitude négligeable ou très faible d'ici 2100 pourraient néanmoins être déclenchées bien avant cette date, et elles pourraient éventuellement générer une force de rétroaction significative sur des périodes plus longues - des siècles et même des millénaires - et ainsi influencer la trajectoire à long terme du système terrestre. Ces processus de rétroaction comprennent le dégel du permafrost, la décomposition des hydrates de

méthane océanique, l'augmentation de la respiration bactérienne marine et la perte des nappes glaciaires polaires accompagnée d'une élévation du niveau de la mer et d'une amplification potentielle de l'élévation de la température par des changements dans la circulation océanique (33).

### Basculements en cascade.

La figure 3 montre une carte globale de quelques cascades potentielles de basculement. Les éléments de basculement se répartissent en trois groupes en fonction de leur température seuil estimée (12, 17, 39). Des cascades pourraient se former lorsqu'une élévation de la température mondiale atteint le niveau de l'amas de basses températures, activant des éléments de basculement, tels que la perte de la calotte glaciaire du Groenland ou de la glace de mer arctique. Ces éléments de basculement, ainsi que certaines des rétroactions des éléments non de basculement (p. ex. affaiblissement graduel des puits de carbone physiologiques terrestres et océaniques), pourraient faire grimper encore plus la température moyenne mondiale, induisant des basculements dans les grappes de températures moyennes et supérieures. Par exemple, le basculement (perte) de la calotte glaciaire du Groenland pourrait déclencher une transition critique dans la circulation océanique méridionale de l'Atlantique (AMOC) qui, en provoquant ensemble, en provoquant l'élévation du niveau de la mer et l'accumulation de chaleur dans l'océan Austral, pourrait accélérer la perte de glace de la calotte glaciaire de l'Antarctique Est (32, 40) à des échelles de temps de plusieurs siècles (41).



**Fig. 3** Carte mondiale des cascades potentielles de basculement. Les différents éléments de basculement sont codés par couleur en fonction des seuils estimés de la température de surface moyenne mondiale (points de basculement) (12, 34). Les flèches montrent les interactions potentielles entre les éléments de basculement, en se basant sur des avis d'experts, qui pourraient générer des cascades. Il est à noter que, bien que le risque de basculement (perte) de banquise de l'Antarctique Est soit proposé à  $>5$  °C, certains secteurs marins de l'Antarctique Est peuvent être vulnérables à des températures plus basses (35 ↓ ↓ ↓ ↓ -38).

Les observations du comportement passé apportent une importante contribution des changements dans la circulation océanique à de telles cascades de rétroaction. Au cours des glaciations précédentes, le système climatique a oscillé entre deux états qui semblent refléter des changements dans l'activité convective dans les mers nordiques et des changements dans l'activité de l'AMOC. Ces variations ont provoqué des schémas typiques de réponse à la température, appelés "balançoires bipolaires" (42 ↓ -44). Par temps extrêmement froid dans le nord, la chaleur s'est accumulée dans l'océan Austral et l'Antarctique s'est réchauffée. Finalement, la chaleur s'est dirigée vers le nord et a généré un réchauffement souterrain qui a peut-être contribué à déstabiliser les bords des calottes glaciaires de l'hémisphère Nord (45). Si le Groenland et la banquise de l'Antarctique occidental fondent à l'avenir, le rafraîchissement et le refroidissement des eaux de surface avoisinantes auront des effets significatifs sur la circulation océanique. Bien qu'il soit difficile de quantifier la probabilité de

changements importants de la circulation, les simulations du modèle climatique suggèrent que les apports d'eau douce compatibles avec les taux actuels de fonte du Groenland sont suffisants pour avoir des effets mesurables sur la température et la circulation océaniques (46, 47). Le réchauffement soutenu des latitudes élevées du Nord à la suite de ce processus pourrait accélérer les rétroactions ou activer des éléments de basculement dans cette région, comme la dégradation du permafrost, la perte de la glace de mer arctique et le dépérissement de la forêt boréale.

Bien que cela puisse sembler être un scénario extrême, il illustre qu'un réchauffement dans la plage de températures même inférieures (c.-à-d. les cibles de Paris) pourrait entraîner un basculement dans les grappes de températures moyennes et supérieures par des effets de cascade. Sur la base de cette analyse des cascades de basculement et en adoptant une approche d'aversion au risque, nous suggérons qu'un seuil planétaire potentiel pourrait se produire à une élévation de température aussi faible que  $\sim 2.0$  °C au-dessus de la température préindustrielle (Fig. 1).

## Trajectoire alternative stabilisée de la terre

Si les sociétés du monde veulent éviter de franchir un seuil potentiel qui enferme le système terrestre dans la voie de « Fournaise Terrestre », il est essentiel qu'elles prennent des décisions délibérées pour éviter ce risque et maintenir le système terrestre dans des conditions semblables à celles de l'Holocène. Cette voie créée par l'homme est représentée dans les figures 1 et 2 par ce que nous appelons la Terre stabilisée (petite boucle en bas de la figure 1, en haut à droite), dans laquelle le système terrestre est maintenu dans un état où l'élévation de température ne dépasse pas 2 °C au-dessus de l'état préindustriel (état "super-holocène") (11). Une Terre stabilisée nécessiterait des réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre, la protection et l'amélioration des puits de carbone de la biosphère, des efforts pour éliminer le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, éventuellement la gestion du rayonnement solaire, et l'adaptation aux impacts inévitables du réchauffement déjà en cours (48). La courte ligne rouge pointillée au-delà de la Terre stabilisée dans la Fig. 1, en haut à droite représente un retour potentiel à des conditions de type interglaciaire à plus long terme.

Essentiellement, la voie de la Terre stabilisée pourrait être conceptualisée comme un régime du système terrestre dans lequel l'humanité joue un rôle actif d'intendance planétaire en maintenant un état intermédiaire entre le cycle de la limite glaciaire et interglaciaire du Quaternaire supérieur et une « Fournaise Terrestre » (Fig. 2). Nous soulignons que la Terre stabilisée n'est pas un état intrinsèque du système terrestre, mais plutôt un état dans lequel l'humanité s'engage dans une voie de gestion continue de sa relation avec le reste du système terrestre.

Un problème critique est que, si un seuil planétaire est franchi vers la voie de la « Fournaise Terrestre », l'accès à la voie de la Terre stabilisée deviendrait très difficile, quelles que soient

les actions que les sociétés humaines pourraient prendre. Au-delà du seuil, les rétroactions positives (de renforcement) au sein du système terrestre - en dehors de l'influence ou du contrôle de l'homme - pourraient devenir le moteur dominant de la trajectoire du système, car les éléments de basculement individuels créent des cascades liées dans le temps et avec l'augmentation de la température (Fig. 3). En d'autres termes, une fois que le système terrestre s'est engagé dans la voie « Fournaise Terrestre », la voie alternative « Terre Stabilisée » deviendrait très probablement inaccessible, comme l'illustre la figure 2.

## Quels sont les enjeux ?

La « Fournaise Terrestre » est susceptible d'être incontrôlable et dangereuse pour beaucoup, en particulier si nous y entrons dans un siècle ou deux, et elle pose de graves risques pour la santé, l'économie, la stabilité politique (12, 39, 49, 50) (surtout pour les plus vulnérables au climat) et, en fin de compte, l'habitabilité de la planète pour les humains.

Les connaissances sur les risques posés par les changements climatiques rapides qui émergent dans l'Anthropocène peuvent être obtenues non seulement à partir d'observations contemporaines (51 ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓) mais aussi à partir des interactions passées entre les sociétés humaines et la variabilité hydroclimatique régionale et saisonnière. Cette variabilité était souvent beaucoup plus prononcée que la variabilité globale et à plus long terme de l'Holocène (Annexe SI). La production agricole et l'approvisionnement en eau sont particulièrement vulnérables aux changements de l'hydroclimat, ce qui conduit à des extrêmes chauds/secs ou froids et humides. Les déclin sociaux, les effondrements, les migrations/réinstallations, les réorganisations et les changements culturels ont souvent été associés à de graves sécheresses régionales et à la méga-sécheresse mondiale de 4,2 à 3,9 mille ans avant notre ère, le tout dans la stabilité relative de l'étroite plage de température mondiale de l'Holocène d'environ  $\pm 1$  °C (56).

Annexe du SI, le tableau S4 résume les biomes et les sous-systèmes climatiques régionaux biosphère-physique régionaux essentiels au bien-être de l'homme et les risques qui en résultent si le système terrestre suit un scénario de « Fournaise Terrestre ». Bien que la plupart de ces biomes ou systèmes régionaux puissent être conservés dans un scénario de Terre stabilisée, la plupart ou la totalité d'entre eux seraient probablement modifiés ou dégradés de façon substantielle dans un scénario de « Fournaise Terrestre », avec de sérieux défis pour la viabilité des sociétés humaines.

Par exemple, les systèmes agricoles sont particulièrement vulnérables parce qu'ils sont organisés spatialement autour des modèles holocènes relativement stables de la productivité primaire terrestre, qui dépendent d'une distribution spatiale bien établie et prévisible de la température et des précipitations par rapport à l'emplacement des sols fertiles ainsi que d'une concentration particulière de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les connaissances actuelles suggèrent que, si un scénario de la Terre stabilisée pourrait aboutir à un équilibre approximatif entre les

augmentations et les diminutions de la production régionale à mesure que les systèmes humains s'adaptent, une trajectoire de « Fournaise Terrestre » dépassera probablement les limites de l'adaptation et entraînera une diminution globale substantielle de la production agricole, une augmentation des prix et une disparité encore plus grande entre les pays riches et les pays pauvres (57).

Les zones côtières du monde, en particulier les deltas de basse altitude et les mers et écosystèmes côtiers adjacents, sont particulièrement importants pour le bien-être de l'homme. Ces régions abritent une grande partie de la population mondiale, la plupart des mégalo-poles émergentes et une quantité importante d'infrastructures vitales tant pour les économies nationales que pour le commerce international. Un scénario de « Fournaise Terrestre » inonderait presque certainement les environnements deltaïques, augmenterait le risque de dommages causés par les tempêtes côtières et éliminerait les récifs coralliens (et tous les avantages qu'ils procurent aux sociétés) d'ici la fin du siècle ou avant (58).

### **Rétroactions humaines dans le système terrestre.**

Dans le récit dominant du changement climatique, l'homme est une force externe qui entraîne le changement du système terrestre d'une manière largement linéaire et déterministe ; plus le forçage en termes d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre est élevé, plus la température moyenne mondiale est élevée. Cependant, notre analyse soutient que les sociétés humaines et nos activités doivent être refondues en tant que composante intégrale et interactive d'un système terrestre complexe et adaptatif. Ce cadre met l'accent non seulement sur la dynamique des systèmes humains qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi sur ceux qui créent ou améliorent les rétroactions négatives qui réduisent le risque que le système terrestre franchisse un seuil planétaire et se verrouille dans un scénario de fournaise.

Le défi de l'humanité est donc d'influencer les propriétés dynamiques du système terrestre de telle sorte que les conditions instables émergentes dans la zone située entre l'Holocène et un état très chaud deviennent un état intermédiaire stable de facto (Terre stabilisée) (Fig. 2). Cela exige que les humains prennent des mesures délibérées, intégrales et adaptatives pour réduire les impacts dangereux sur le système terrestre, en surveillant efficacement et en changeant le comportement pour former des boucles de rétroaction qui stabilisent cet état intermédiaire.

Il y a beaucoup d'incertitude et de débats sur la façon d'y parvenir - techniquement, éthiquement, équitablement et économiquement - et il ne fait aucun doute que les aspects normatifs, politiques et institutionnels sont très difficiles. Cependant, les sociétés pourraient prendre un large éventail de mesures qui constituent des rétroactions négatives, résumées dans l'annexe du SI, tableau S5, pour orienter le système terrestre vers la Terre stabilisée. Certaines de ces actions modifient déjà les trajectoires d'émissions. Les actions de rétroaction négative se répartissent en trois grandes catégories : (i) réduire les émissions de gaz à effet de serre, (ii) renforcer ou créer des puits de carbone (par exemple, protéger et renforcer les

puits de carbone de la biosphère et créer de nouveaux types de puits) (59), et (iii) modifier le bilan énergétique de la Terre (par exemple, par la gestion du rayonnement solaire, bien que cette rétroaction particulière comporte de très grands risques de déstabilisation ou de dégradation de plusieurs processus clés du système terrestre) (60, 61). Bien que la réduction des émissions soit une priorité, on pourrait faire beaucoup plus pour réduire les pressions humaines directes sur les biomes critiques qui contribuent à la régulation de l'état du système terrestre par des puits de carbone et des rétroactions d'humidité, comme l'Amazonie et les forêts boréales (tableau 1), et pour bâtir une intendance beaucoup plus efficace de la biosphère marine et terrestre en général.

Toutefois, le système socio-économique dominant actuel repose sur une croissance économique à forte intensité de carbone et sur l'exploitation des ressources (9). Les tentatives de modification de ce système ont connu un certain succès au niveau local, mais peu de succès au niveau mondial en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre ou de mise en place d'une gestion plus efficace de la biosphère. Les changements linéaires incrémentaux du système socio-économique actuel ne suffisent pas à stabiliser le système terrestre. Des transformations généralisées, rapides et fondamentales seront probablement nécessaires pour réduire le risque de franchir le seuil et de s'enfermer dans la voie « Fournaise Terrestre » ; il s'agit notamment de changements de comportement, de technologie et d'innovation, de gouvernance et de valeurs (48, 62, 63).

Les efforts internationaux visant à réduire les impacts humains sur le système terrestre tout en améliorant le bien-être comprennent les objectifs de développement durable des Nations Unies et l'engagement pris dans l'accord de Paris de maintenir le réchauffement en dessous de 2 °C. Ces initiatives de gouvernance internationale s'accompagnent d'engagements de réduction des émissions de carbone par les pays, les villes, les entreprises et les particuliers (64 ↓ -66), mais jusqu'à présent, ils ne suffisent pas à atteindre l'objectif de Paris. Une ambition accrue nécessitera de nouvelles valeurs, principes et cadres partagés collectivement, ainsi que l'éducation pour soutenir de tels changements (67, 68). Essentiellement, l'intendance efficace du système terrestre est une condition préalable essentielle au développement prospère des sociétés humaines dans un scénario de Terre stabilisée (69, 70).

En plus de l'innovation institutionnelle et sociale au niveau de la gouvernance mondiale, les changements dans la démographie, la consommation, les comportements, les attitudes, l'éducation, les institutions et les technologies socialement intégrées sont tous importants pour maximiser les chances de parvenir à une voie de la Terre stabilisée (71). Bon nombre des changements nécessaires peuvent prendre des décennies avant d'avoir un impact global (Annexe du SI, tableau S5), mais il y a des indications que la société pourrait atteindre des points de basculement sociétal importants. Par exemple, des progrès relativement rapides ont été réalisés en vue de ralentir ou d'inverser la croissance démographique grâce à la baisse de la fécondité résultant de l'autonomisation des femmes, de l'accès aux technologies de contrôle des naissances, de l'expansion des possibilités d'éducation et de l'augmentation des

niveaux de revenu (72, 73). Ces changements démographiques doivent être complétés par des modes de consommation durables par habitant, en particulier parmi les consommateurs les plus élevés par habitant. Certains changements dans le comportement des consommateurs ont été observés (74, 75), et des opportunités de transitions majeures dans les normes sociales à grande échelle peuvent survenir (76). L'innovation technologique contribue à une décarbonisation plus rapide et à la possibilité d'éliminer le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (48).

***En fin de compte, les transformations nécessaires pour réaliser la voie de la Terre stabilisée exigent une réorientation fondamentale et une restructuration des institutions nationales et internationales vers une gouvernance plus efficace au niveau du système terrestre (77), en mettant davantage l'accent sur les préoccupations planétaires en matière de gouvernance économique, de commerce mondial, d'investissements et de finances, et de développement technologique (78).***

### **La résilience dans un monde en transformation rapide**

Même si l'on parvient à stabiliser la trajectoire de la Terre, l'humanité devra faire face à une route turbulente de changements rapides et profonds et d'incertitudes sur la route qui la mène - politiquement, socialement et écologiquement - qui met à l'épreuve la résilience des sociétés humaines (79 ↓ ↓ ↓ -82). La Terre stabilisée sera probablement plus chaude qu'à tout autre moment au cours des 800 000 dernières années au moins (83) (c'est-à-dire plus chaude qu'à tout autre moment où l'homme moderne a existé).

De plus, la trajectoire de la Terre stabilisée sera presque certainement caractérisée par l'activation de certains éléments de basculement (Cascades de basculement et Fig. 3) et par une dynamique non linéaire et des changements brusques au niveau des biomes critiques qui soutiennent l'humanité (Annexe SI, Tableau S4). Les taux actuels de changement des caractéristiques importantes du système terrestre correspondent ou dépassent déjà ceux d'événements géophysiques abrupts dans le passé (Annexe du SI). Ces tendances étant susceptibles de se poursuivre pendant plusieurs décennies au moins, la façon contemporaine d'orienter le développement fondé sur des théories, des outils et des croyances de changement graduel ou progressif, en mettant l'accent sur l'efficacité économique, ne sera probablement pas suffisante pour faire face à cette trajectoire. Ainsi, en plus de l'adaptation, l'augmentation de la résilience deviendra une stratégie clé pour naviguer dans l'avenir.

Les stratégies génériques de renforcement de la résilience comprennent le développement de l'assurance, des tampons, de la redondance, de la diversité et d'autres caractéristiques de la résilience qui sont essentielles pour transformer les systèmes humains face au réchauffement et aux surprises possibles associées aux points de basculement (84). Les caractéristiques d'une telle stratégie comprennent (i) le maintien de la diversité, de la modularité et de la redondance ; (ii) la gestion de la connectivité, de l'ouverture, des variables lentes et des rétroactions ; (iii) la compréhension des systèmes socio-écologiques comme des systèmes adaptatifs complexes, en particulier au niveau du système terrestre dans son ensemble (85) ;

(iv) l'encouragement de l'apprentissage et de l'expérimentation ; et (v) l'élargissement de la participation et l'établissement de la confiance pour promouvoir des systèmes de gouvernance polycentrique (86, 87).

## Conclusions

Notre approche systémique, axée sur les rétroactions, les points de basculement et la dynamique non linéaire, a répondu aux quatre questions posées dans l'introduction.

Notre analyse suggère que le système terrestre s'approche peut-être d'un seuil planétaire qui pourrait s'enfermer dans une voie rapide et continue vers des conditions beaucoup plus chaudes - la Terre Fournaise. Ce scénario serait propulsée par des rétroactions biogéophysiques intrinsèques fortes et difficiles à influencer par des actions humaines, une voie qui ne pourrait pas être inversée, dirigée ou considérablement ralentie.

Lorsqu'un tel seuil est incertain, mais il pourrait n'être en avance que de quelques décennies à une augmentation de la température de  $\sim 2.0$  °C au-dessus de la température préindustrielle, et donc, il pourrait se situer dans la fourchette des objectifs de température de l'Accord de Paris.

Les impacts d'un scénario de type « fournaise » sur les sociétés humaines seraient probablement massifs, parfois abrupts et sans aucun doute perturbateurs.

Éviter ce seuil en créant une voie de la Terre stabilisée ne peut être atteint et maintenu que par un effort coordonné et délibéré des sociétés humaines pour gérer notre relation avec le reste du système terrestre, en reconnaissant que l'humanité est une composante intégrale et interactive du système. L'humanité est aujourd'hui confrontée à la nécessité de décisions et d'actions critiques qui pourraient influencer notre avenir pendant des siècles, voire des millénaires (88).

Dans quelle mesure cette analyse est-elle crédible ? Il existe des preuves significatives provenant d'un certain nombre de sources que le risque d'un seuil planétaire et, par conséquent, la nécessité de créer une voie divergente doit être prise au sérieux :

- Premièrement, le comportement complexe du système terrestre dans le Quaternaire supérieur est bien documenté et bien compris. Les deux états limitrophes du système - glaciaire et interglaciaire - sont raisonnablement bien définis. La périodicité de 100 000 ans du cycle limite est établie, et les processus de conduite internes (cycle du carbone et albédo de la glace) et externes (changements de l'insolation causés par les changements des paramètres orbitaux de la Terre) sont généralement bien connus. De plus, nous savons avec une grande confiance que la désintégration progressive des nappes glaciaires et la transgression d'autres éléments de basculement sont difficiles à inverser une fois que les niveaux critiques de réchauffement sont atteints.

- Deuxièmement, les perspectives du passé géologique récent de la Terre (Annexe du SI) suggèrent que les conditions compatibles avec la voie de « Fournaise Terrestre » sont

accessibles avec les niveaux de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique et l'élévation de température déjà réalisés ou projetés pour ce siècle (Annexe du SI, Tableau S1).

- Troisièmement, les éléments de basculement et les processus de rétroaction qui ont fonctionné sur les cycles glaciaires et interglaciaires quaternaires sont les mêmes que plusieurs de ceux qui sont proposés comme critiques pour la trajectoire future du système terrestre (rétroaction biogéophysique, Cascades de basculement, figure 3, tableau 1, et annexe du SI, tableau S2).

- Quatrièmement, les observations contemporaines (29, 38) (Annexe SI) du comportement des éléments de basculement à une anomalie de température observée d'environ 1 °C au-dessus de la température préindustrielle suggèrent que certains de ces éléments sont vulnérables à une augmentation de la température globale de 1 °C à 3 °C, et beaucoup plus vulnérables à des températures plus élevées (rétroactions biogéophysiques et cascades de basculement) (12, 17, 39). Cela suggère que le risque de basculement en cascade pourrait être important à une élévation de température de 2 °C et pourrait augmenter fortement au-delà de ce point. Nous soutenons qu'un seuil planétaire dans le système terrestre pourrait exister à une élévation de température aussi faible que 2 °C au-dessus du niveau préindustriel.

La trajectoire de la Terre stabilisée exige une gestion délibérée des relations de l'humanité avec le reste du système terrestre si l'on veut éviter que le monde ne franchisse un seuil planétaire. Nous suggérons qu'une transformation profonde basée sur une réorientation fondamentale des valeurs humaines, de l'équité, du comportement, des institutions, des économies et des technologies est nécessaire. Même ainsi, le cheminement vers la Terre stabilisée impliquera des changements considérables à la structure et au fonctionnement du système terrestre, ce qui suggère que les stratégies de renforcement de la résilience reçoivent une priorité beaucoup plus élevée qu'à l'heure actuelle dans la prise de décision. Certains signes indiquent que les sociétés sont en train d'amorcer certaines des transformations nécessaires. Cependant, ces transformations en sont encore à un stade initial, et les points de basculement social/politique qui éloignent définitivement la trajectoire actuelle de la « Fournaise Terrestre » n'ont pas encore été franchis, tandis que la porte de la voie de la Terre stabilisée peut se fermer rapidement.

Notre analyse initiale doit être étayée par une analyse quantitative plus approfondie du système terrestre et des études de modélisation pour répondre à trois questions critiques. (i) L'humanité risque-t-elle de pousser le système au-delà d'un seuil planétaire et de s'engager irréversiblement sur la voie de la fournaise ? (ii) Quelles sont les autres voies possibles dans le paysage complexe de stabilité du système terrestre, et quels sont les risques qu'elles peuvent comporter ? (iii) Quelles stratégies d'intendance planétaire sont nécessaires pour maintenir le système terrestre dans un état de Terre stabilisée gérable ?

## Remerciements

Nous remercions les trois membres du comité de lecture pour leurs commentaires sur la première version du manuscrit et deux des membres pour leurs commentaires sur une version révisée du manuscrit. Ces commentaires ont été très utiles dans les révisions. Nous remercions un membre du comité de rédaction du PNAS pour cet examen exhaustif et très utile. W.S. et C.P.P.S. sont membres du Groupe de travail Anthropocène. W.S., J.R., K.R., K.R., S.E.C., J.F.D., I.F., S.J.L., R.W. et H.J.S. sont membres du Planetary Boundaries Research Network PB.net et du programme EarthDoc de la Ligue de la Terre soutenu par la Fondation Stordalen. T.M.M.L. a reçu le prix du mérite de la Royal Society Wolfson Research Merit Award et le projet HELIX du programme-cadre 7 de l'Union européenne. C.F. a été soutenu par la Fondation de la famille Erling-Persson. La participation de D.L. a été soutenue par le Haury Program in Environment and Social Justice et la National Science Foundation (USA) Decadal and Regional Climate Prediction using Earth System Models Grant 1243125. S.E.C.S. a été soutenu en partie par le Conseil suédois de la recherche Formas Grant 2012-742. J.F.D. et R.W. ont été soutenus par l'Association Leibniz Project DOMINOES. S.J.L. reçoit des fonds de la subvention Formas 2014-589. Cet article est une contribution à la subvention avancée 2016 du Conseil européen de la recherche, Earth Resilience in the Anthropocene Project 743080.

## Références documentation

### References

1. Crutzen PJ (2002) Geology of mankind. *Nature* 415:23. CrossRef PubMed Google Scholar
2. Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C (2015) The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *Anthropocene Rev* 2:81–98. .Google Scholar
3. Waters CN, et al. (2016) The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* 351:aad2622. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
4. Malm A, Hornborg A (2014) The geology of mankind? A critique of the Anthropocene narrative. *Anthropocene Rev* 1:62–69. .Google Scholar
5. Donges JF, et al. (2017) Closing the loop: Reconnecting human dynamics to Earth System science. *Anthropocene Rev* 4:151–157. .Google Scholar
6. Levin SA (2003) Complex adaptive systems: Exploring the known, the unknown and the unknowable. *Bull Am Math Soc* 40:3–20. .CrossRefGoogle Scholar
7. Past Interglacial Working Group of PAGES (2016) Interglacials of the last 800,000 years. *Rev Geophys* 54:162–219. .Google Scholar
8. Williams M, et al. (2015) The Anthropocene biosphere. *Anthropocene Rev* 2:196–219. .Google Scholar

9. McNeill JR, Engelke P (2016) *The Great Acceleration* (Harvard Univ Press, Cambridge, MA). .Google Scholar
10. Hawkins E, et al. (2017) Estimating changes in global temperature since the pre-industrial period. *Bull Am Meteorol Soc* 98:1841–1856. .Google Scholar
11. Ganopolski A, Winkelmann R, Schellnhuber HJ (2016) Critical insolation-CO<sub>2</sub> relation for diagnosing past and future glacial inception. *Nature* 529:200–203. .Google Scholar
12. Schellnhuber HJ, Rahmstorf S, Winkelmann R (2016) Why the right climate target was agreed in Paris. *Nat Clim Change* 6:649–653. .Google Scholar
13. Schellnhuber HJ (1999) 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402(Suppl):C19–C23. .CrossRefGoogle Scholar
14. IPCC (2013) Summary for policymakers. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 3–29. .Google Scholar
15. Drijfhout S, et al. (2015) Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. *Proc Natl Acad Sci USA* 112:E5777–E5786. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
16. Stocker TF, et al. (2013) Technical summary. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK). .Google Scholar
17. Lenton TM, et al. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:1786–1793. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
18. Scheffer M (2009) *Critical Transitions in Nature and Society* (Princeton Univ Press, Princeton). .Google Scholar
19. Raupach MR, et al. (2014) The declining uptake rate of atmospheric CO<sub>2</sub> by land and ocean sinks. *Biogeosciences* 11:3453–3475. .CrossRefGoogle Scholar
20. Schaefer K, Lantuit H, Romanovsky VE, Schuur EAG, Witt R (2014) The impact of the permafrost carbon feedback on global climate. *Environ Res Lett* 9:085003. .CrossRefGoogle Scholar
21. Schneider von Deimling T, et al. (2015) Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12:3469–3488. .Google Scholar
22. Koven CD, et al. (2015) A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon-climate feedback. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 373:20140423. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
23. Chadburn SE, et al. (2017) An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nat Clim Change* 7:340–344. .Google Scholar

24. Ciais P, et al. (2013) Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed Stocker TF, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 465–570. .Google Scholar
25. Segschneider J, Bendtsen J (2013) Temperature-dependent remineralization in a warming ocean increases surface pCO<sub>2</sub> through changes in marine ecosystem composition. *Global Biogeochem Cycles* 27:1214–1225. .Google Scholar
26. Bendtsen J, Hilligsøe KM, Hansen J, Richardson K (2015) Analysis of remineralisation, lability, temperature sensitivity and structural composition of organic matter from the upper ocean. *Prog Oceanogr* 130:125–145. .Google Scholar
27. Jones C, Lowe J, Liddicoat S, Betts R (2009) Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nat Geosci* 2:484–487. .CrossRefGoogle Scholar
28. Kurz WA, Apps MJ (1999) A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecol Appl* 9:526–547. .Google Scholar
29. Lewis SL, Brando PM, Phillips OL, van der Heijden GMF, Nepstad D (2011) The 2010 Amazon drought. *Science* 331:554. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
30. Herzsuh U, et al. (2016) Glacial legacies on interglacial vegetation at the Pliocene-Pleistocene transition in NE Asia. *Nature Commun* 7:11967. .Google Scholar
31. Mao J, et al. (2016) Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nat Clim Change* 6:959–963. .Google Scholar
32. Keenan TF, et al. (2016) Recent pause in the growth rate of atmospheric CO<sub>2</sub> due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nature Commun* 7:13428, and erratum (2017) 8:16137. .Google Scholar
33. Hansen J, et al. (2016) Ice melt, sea level rise and superstorms: Evidence from paleoclimatedata, climate modeling, and modern observations that 2 °C global warming could be dangerous. *Atmos Chem Phys* 16:3761–3812. .CrossRefGoogle Scholar
34. Kriegler E, Hall JW, Held H, Dawson R, Schellnhuber HJ (2009) Imprecise probability assessment of tipping points in the climate system. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:5041–5046. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
35. Pollard D, DeConto RM (2009) Modelling West Antarctic ice sheet growth and collapse through the past five million years. *Nature* 458:329–332. .CrossRefPubMedGoogle Scholar
36. Pollard D, DeConto RM, Alley RB (2015) Potential Antarctic Ice Sheet retreat driven by hydrofracturing and ice cliff failure. *Earth Planet Sci Lett* 412:112–121. .Google Scholar
37. DeConto RM, Pollard D (2016) Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531:591–597. .CrossRefPubMedGoogle Scholar
38. Rintoul SR, et al. (2016) Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. *Sci Adv* 2:e1601610. .FREE Full TextGoogle Scholar

39. US Department of Defense (2015) National security implications of climate-related risks and a changing climate. Available at [archive.defense.gov/pubs/150724-congressional-report-on-national-implications-of-climate-change.pdf?source=govdelivery](https://archive.defense.gov/pubs/150724-congressional-report-on-national-implications-of-climate-change.pdf?source=govdelivery). Accessed February 7, 2018. .Google Scholar
40. Mengel M, Levermann A (2014) Ice plug prevents irreversible discharge from East Antarctica. *Nat Clim Change* 4:451–455. .Google Scholar
41. Armour KC, et al. (2016) Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. *Nat Geosci* 9:549–554. .CrossRefGoogle Scholar
42. Stocker TF, Johnsen SJ (2003) A minimum thermodynamic model for the bipolar seesaw. *Paleoceanography* 18, 1087. .Google Scholar
43. Rahmstorf S (2002) Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419:207–214. .CrossRefPubMedGoogle Scholar
44. Hemming SR (2004) Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Rev Geophys* 42:1–43. .Google Scholar
45. Alvarez-Solas J, et al. (2010) Link between ocean temperature and iceberg discharge during Heinrich events. *Nat Geosci* 3:122–126. .CrossRefGoogle Scholar
46. Stouffer RJ, et al. (2006) Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *J Clim* 19:1365–1387. .Google Scholar
47. Swingedow D, et al. (2013) Decadal fingerprints of freshwater discharge around Greenland in a multi-model ensemble. *Clim Dyn* 41:695–720. .Google Scholar
48. Rockström J, et al. (2017) A roadmap for rapid decarbonization. *Science* 355:1269–1271. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
49. Schleussner C-F, Donges JF, Donner RV, Schellnhuber HJ (2016) Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc Natl Acad Sci USA* 113:9216–9221. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
50. McMichael AJ, et al., ed (2003) *Climate Change and Human Health: Risks and Responses* (WHO, Geneva). .Google Scholar
51. Udmale PD, et al. (2015) How did the 2012 drought affect rural livelihoods in vulnerable areas? Empirical evidence from India. *Int J Disaster Risk Reduct* 13:454–469. .Google Scholar
52. Maldonado JK, Shearer C, Bronen R, Peterson K, Lazrus H (2013) The impact of climate change on tribal communities in the US: Displacement, relocation, and human rights. *Clim Change* 120:601–614. .Google Scholar
53. Warner K, Afifi T (2014) Where the rain falls: Evidence from 8 countries on how vulnerable households use migration to manage the risk of rainfall variability and food insecurity. *Clim Dev* 6:1–17. .Google Scholar
54. Cheung WW, Watson R, Pauly D (2013) Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature* 497:365–368. .CrossRefPubMedGoogle Scholar

55. Nakano K (2017) Screening of climatic impacts on a country's international supply chains: Japan as a case study. *Mitig Adapt Strategies Glob Change* 22:651–667. .Google Scholar
56. Latorre C, Wilmshurst J, von Gunten L, eds (2016) Climate change and cultural evolution. *PAGES (Past Global Changes) Magazine* 24:1–32. .Google Scholar
57. IPCC (2014) Summary for policymakers. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed Field CB, et al. (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK), pp 1–32. .Google Scholar
58. Schleussner C-F, et al. (2016) Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Change* 6:827–835. .Google Scholar
59. Griscom BW, et al. (2017) Natural climate solutions. *Proc Natl Acad Sci USA* 114:11645–11650. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
60. Barrett S, et al. (2014) Climate engineering reconsidered. *Nat Clim Change* 4:527–529. .Google Scholar
61. Mathesius S, Hofmann M, Calderia K, Schellnhuber HJ (2015) Long-term response of oceans to CO<sub>2</sub> removal from the atmosphere. *Nat Clim Change* 5:1107–1113. .Google Scholar
62. Geels FW, Sovacool BK, Schwanen T, Sorrell S (2017) Sociotechnical transitions for deep decarbonization. *Science* 357:1242–1244. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
63. O'Brien K (2018) Is the 1.5 °C target possible? Exploring the three spheres of transformation. *Curr Opin Environ Sustain* 31:153–160. .Google Scholar
64. Young OR, et al. (2006) The globalization of socioecological systems: An agenda for scientific research. *Glob Environ Change* 16:304–316. .Google Scholar
65. Adger NW, Eakin H, Winkels A (2009) Nested and teleconnected vulnerabilities to environmental change. *Front Ecol Environ* 7:150–157. .CrossRefGoogle Scholar
66. UN General Assembly (2015) Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1. Available at <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>. Accessed July 18, 2018. .Google Scholar
67. Wals AE, Brody M, Dillon J, Stevenson RB (2014) Science education. Convergence between science and environmental education. *Science* 344:583–584. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
68. O'Brien K, et al. (2013) You say you want a revolution? Transforming education and capacity building in response to global change. *Environ Sci Policy* 28:48–59. .Google Scholar
69. Chapin FS III, et al. (2011) Earth stewardship: A strategy for social–ecological transformation to reverse planetary degradation. *J Environ Stud Sci* 1:44–53. .Google

Scholar

70. Folke C, Biggs R, Norström AV, Reyers B, Rockström J (2016) Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. *Ecol Soc* 21:41. .Google Scholar
71. Westley F, et al. (2011) Tipping toward sustainability: Emerging pathways of transformation. *Ambio* 40:762–780. .PubMedGoogle Scholar
72. Lutz W, Muttarak R, Striessnig E (2014) Environment and development. Universal education is key to enhanced climate adaptation. *Science* 346:1061–1062. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
73. Bongaarts J (2016) Development: Slow down population growth. *Nature* 530:409–412. .PubMedGoogle Scholar
74. Defila R, Di Giulio A, Kaufmann-Hayoz R, eds (2012) *The Nature of Sustainable Consumption and How to Achieve It: Results from the Focal Topic “From Knowledge to Action—New Paths Towards Sustainable Consumption”* (Oakum, Munich). .Google Scholar
75. Cohen MJ, Szejnwald Brown H, Vergragt P, eds (2013) *Innovations in Sustainable Consumption: New Economics, Socio-Technical Transitions and Social Practices* (Edward Elgar, Cheltenham, UK). .Google Scholar
76. Nyborg K, et al. (2016) Social norms as solutions. *Science* 354:42–43. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
77. Biermann F, et al. (2012) Science and government. Navigating the anthropocene: Improving Earth system governance. *Science* 335:1306–1307. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
78. Galaz V (2014) *Global Environmental Governance, Technology and Politics: The Anthropocene Gap* (Edward Elgar, Cheltenham, UK). .Google Scholar
79. Peters DPC, et al. (2004) Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proc Natl Acad Sci USA* 101:15130–15135. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
80. Walker B, et al. (2009) Environment. Looming global-scale failures and missing institutions. *Science* 325:1345–1346. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
81. Hansen J, Sato M, Ruedy R (2012) Perception of climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 109:E2415–E2423. .Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
82. Galaz V, et al. (2017) Global governance dimensions of globally networked risks: The state of the art in social science research. *Risks Hazards Crisis Public Policy* 8:4–27. .Google Scholar
83. Augustin L, et al., EPICA community members (2004) Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature* 429:623–628. .CrossRefPubMedGoogle Scholar
84. Polasky S, Carpenter SR, Folke C, Keeler B (2011) Decision-making under great uncertainty: Environmental management in an era of global change. *Trends Ecol Evol* 26:398–404. .CrossRefPubMedGoogle Scholar

85. Capra F, Luisi PL (2014) The Systems View of Life; A Unifying Vision (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK). .Google Scholar
86. Carpenter SR, et al. (2012) General resilience to cope with extreme events. Sustainability 4:3248–3259. .CrossRefGoogle Scholar
87. Biggs R, et al. (2012) Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services. Annu Rev Environ Resour 37:421–448. .CrossRefGoogle Scholar
88. Figueres C, et al. (2017) Three years to safeguard our climate. Nature 546:593–595. .Google Scholar

## [Les auteurs \(lien\)](#)

- [Télécharger le pdf de cet article \(original PNAS\)](#)
- [Voir aussi en complément "supporting information: Holocene variability and anthropocene rates of change](#)
- [Suivre mon fil rss sur le changement climatique](#)