The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Combien de temps la Terre peut-elle rester verte ? Un modèle climatique propose des fourchettes, pas une date de fin du monde

Vingt-neuf simulations climatiques tridimensionnelles situent différentes limites de la biosphère photosynthétique terrestre entre environ 1,35 et 1,87 milliard d'années dans le futur. Ces valeurs dépendent de trajectoires volontairement simplifiées pour l'altération des roches, la chaleur et les plus faibles concentrations de dioxyde de carbone que les plantes pourraient utiliser. Elles ne prédisent ni la disparition de toutes les plantes, ni celle de toute vie, de la civilisation ou de la planète.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Combien de temps la Terre peut-elle rester verte ? Un modèle climatique propose des fourchettes, pas une date de fin du monde

Une feuille ne vit que grâce à un compromis étroit. Il lui faut de la lumière, de l'eau, du dioxyde de carbone et une température que sa chimie puisse tolérer. À l'échelle d'une vie humaine, le Soleil semble être la partie fixe de ce compromis. À l'échelle d'un milliard d'années, il ne l'est pas.

À mesure que le Soleil vieillit sur la séquence principale, sa luminosité augmente lentement. Davantage de rayonnement solaire réchauffe la Terre, mais la planète dispose d'une réponse à long terme : les réactions entre l'eau de pluie, le dioxyde de carbone et les roches silicatées peuvent retirer du dioxyde de carbone de l'atmosphère. Cela affaiblit l'effet de serre et compense une partie du réchauffement. La même réponse qui refroidit la planète peut finir par priver les organismes photosynthétiques du carbone dont ils se servent pour construire leurs tissus vivants.

Un nouvel article du *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* demande quelle limite pourrait arriver la première : trop de chaleur ou trop peu de dioxyde de carbone. Sa réponse n'est pas une date à laquelle la Terre mourrait. Dans deux trajectoires futures volontairement simplifiées, les limites retenues pour la vie photosynthétique se situent entre environ **1,35 et 1,87 milliard d'années à partir d'aujourd'hui**.

Cette fourchette concerne la **biosphère végétative** : la partie du système vivant terrestre entretenue par les organismes photosynthétiques, en particulier les plantes et les autres formes de vie qui transforment la lumière et le dioxyde de carbone en matière biologique. Ce n'est pas une prévision pour chaque microbe. Ce n'est pas la durée de vie de la civilisation humaine. Ce n'est pas la durée de vie de la planète.

Le thermostat planétaire possède deux réglages incertains

L'incertitude centrale est l'**altération des silicates**. Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau de pluie, réagit avec les roches silicatées et finit par être transporté vers les océans et les sédiments. Les volcans restituent du dioxyde de carbone sur les temps géologiques. Ensemble, ces processus font partie du cycle carbonate-silicate, souvent décrit comme un thermostat planétaire.

Dans un monde plus chaud et plus humide, l'altération pourrait s'accélérer et retirer plus rapidement le dioxyde de carbone. Mais les scientifiques ne savent pas avec quelle force cette réponse gouvernera la Terre sous un Soleil futur plus lumineux. Jacob Haqq-Misra et Eric Wolf n'ont donc pas choisi une trajectoire supposée correcte. Ils ont modélisé deux **cas limites** : des cas volontairement extrêmes destinés à encadrer l'incertitude.

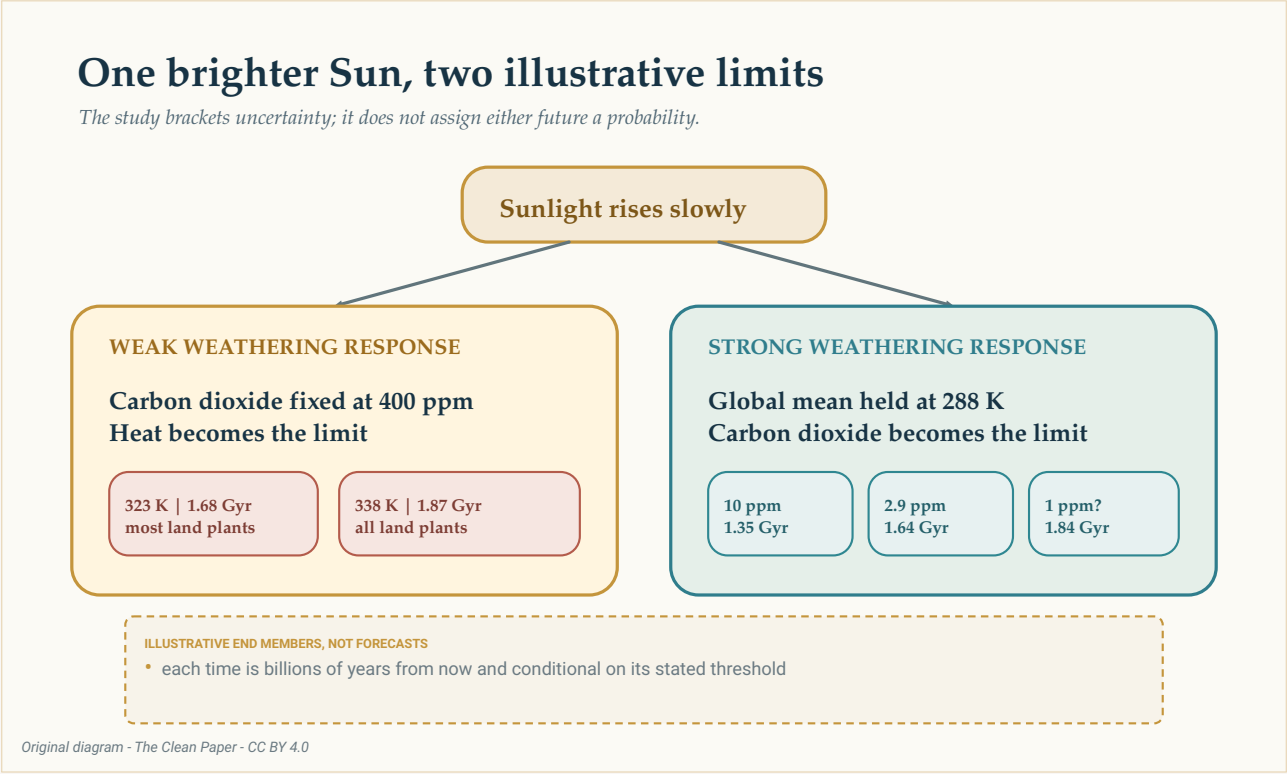
- Dans le **cas limite de faible altération**, le dioxyde de carbone atmosphérique reste à 400 parties par million tandis que l'augmentation de la luminosité solaire fait monter la température.
- Dans le **cas limite de forte altération**, la température moyenne mondiale de surface reste à 288

kelvins, soit environ 15 degrés Celsius, tandis que la concentration de dioxyde de carbone diminue à mesure que l'ensoleillement augmente.

Aucune de ces branches n'est présentée comme le futur réel de la Terre. La première demande ce que ferait la chaleur si le dioxyde de carbone restait élevé. La seconde demande ce que ferait le manque de carbone si l'altération maintenait la température mondiale proche de sa moyenne actuelle.

Comment l'altération peut-elle agir comme un thermostat ?

L'analogie porte sur une rétroaction, pas sur un bouton de réglage littéral. Lorsqu'un climat plus chaud accélère l'altération chimique, davantage de dioxyde de carbone atmosphérique peut finir dans des substances dissoutes, des minéraux et des sédiments. Le retrait de ce gaz à effet de serre s'oppose à une partie du réchauffement initial. À très longue échéance, le dégazage volcanique restitue du dioxyde de carbone.
La force de chaque maillon dépend des précipitations, des roches exposées, de l'érosion, de la biologie, de la tectonique et de la chimie des océans. C'est pourquoi l'article teste des réponses limites au lieu de considérer le thermostat comme une machine bien connue.



L'article encadre un futur incertain avec deux cas limites illustratifs. Si l'altération réagit faiblement, la hausse de la chaleur atteint les seuils retenus pour les plantes terrestres. Si elle réagit fortement, la baisse du dioxyde de carbone atteint les seuils retenus pour la photosynthèse. Ce sont des branches conditionnelles du modèle, non des probabilités ni des comptes à rebours.

The Clean Paper CC BY 4.0

Vingt-neuf mondes-modèles stabilisés, pas un film de deux milliards d'années

Les chercheurs ont utilisé ExoCAM, un modèle climatique mondial tridimensionnel, pour calculer **29 climats à l'état stationnaire** correspondant à diverses combinaisons d'un ensoleillement plus intense et d'une concentration plus faible de dioxyde de carbone. Chaque cas a été exécuté pendant 70 années de modèle. Ici, une année de modèle est un cycle annuel simulé dans des conditions fixes : c'est une durée de calcul qui permet au climat artificiel de se stabiliser, et non une étape d'une prévision année par année du futur terrestre. Les 20 dernières années ont été moyennées après que le climat simulé a eu le temps de se stabiliser.

Ces 29 cas sont des mondes-modèles séparés. Chaque exécution correspond à un point d'une grille et répond à la question : « Quel climat stabilisé convient à ce couple choisi d'ensoleillement et de dioxyde de carbone ? » L'ordinateur n'est pas parti de la Terre actuelle pour faire évoluer en continu son atmosphère, ses roches, ses océans et ses êtres vivants pendant les deux prochains milliards d'années. Les auteurs ont plutôt tracé les deux trajectoires schématiques d'altération à travers ces points précalculés ; le chemin entre les points n'a pas lui-même été simulé.

Le tableau reproduit les combinaisons d'ensoleillement et de dioxyde de carbone de l'archive officielle des données du modèle. Les identifiants de cas sont des repères de lecture ajoutés ici dans l'ordre de l'archive. **S/S0** est la constante solaire relative : l'énergie solaire incidente utilisée dans le modèle divisée par sa valeur actuelle, S0. Une valeur de 1,2 signifie donc 20 % d'énergie solaire incidente de plus qu'aujourd'hui. **CO2 (ppm)** est le rapport de mélange du dioxyde de carbone atmosphérique, exprimé en molécules par million de molécules atmosphériques.

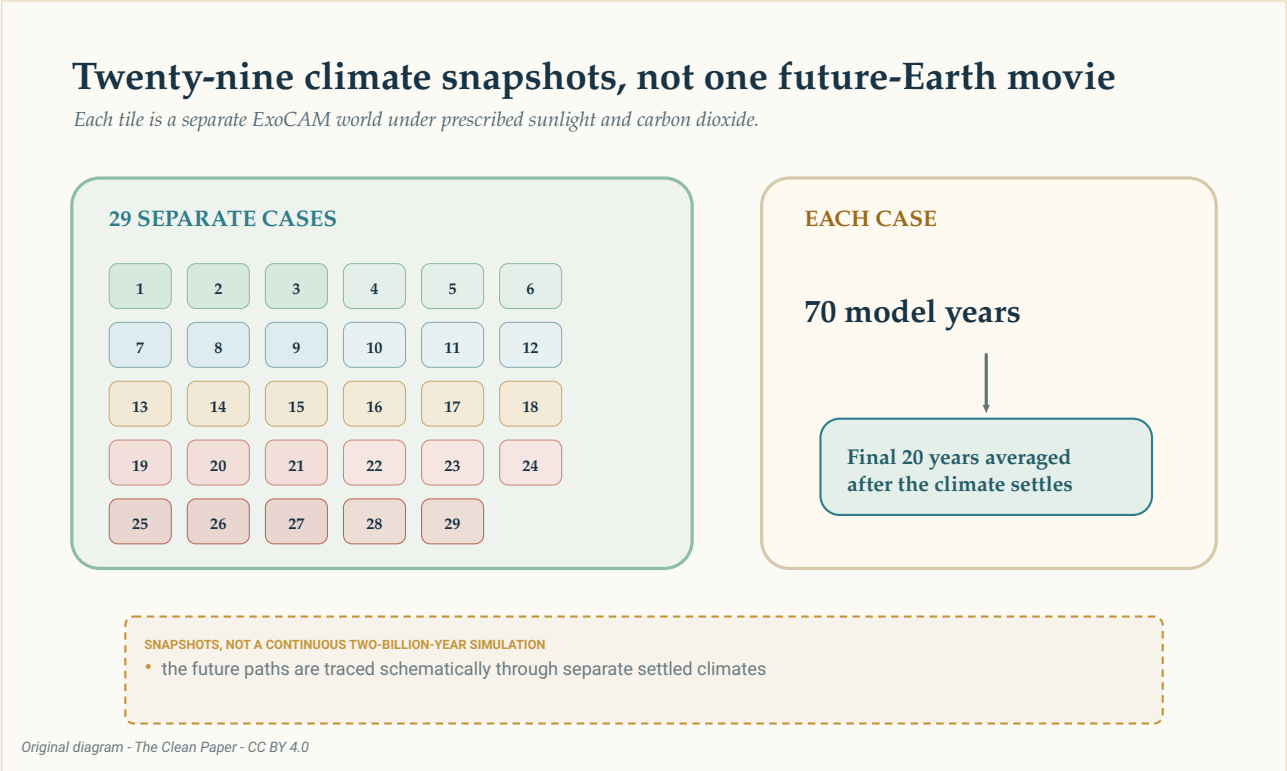
Identifiant du cas	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625

Identifiant du cas	S/S0	CO2 (ppm)
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

La Terre du modèle est reconnaissable, mais volontairement limitée. Elle a la taille de la Terre et utilise la géographie actuelle. Elle possède un océan en couche simplifié plutôt qu'un océan à circulation complète, une pression atmosphérique fixée à peu près à la valeur terrestre actuelle — un bar — et une concentration fixe de méthane. Son orbite est parfaitement circulaire (excentricité nulle) et son axe de rotation n'est pas incliné (obliquité nulle). Elle ne contient ni sols ni végétation explicites, ni rétroaction provenant d'une biosphère qui se transforme. Surtout, le modèle climatique n'est pas couplé dynamiquement à un modèle d'altération des roches. Autrement dit, ExoCAM ne calculé pas l'altération pour mettre à jour le dioxyde de carbone avant de lancer le climat suivant dans une boucle de rétroaction. Les chercheurs ont plutôt prescrit les deux trajectoires limites et les ont suivies dans la grille de 29 climats.

Que signifie « état stationnaire » dans un modèle climatique ?

Un cas à l'état stationnaire est un climat de modèle que l'on laisse se stabiliser sous un Soleil et une atmosphère choisis. Le temps météorologique continue à varier d'un jour et d'une année à l'autre dans la simulation, mais ses moyennes à long terme cessent de dériver fortement. Cela est utile pour demander : « Quel climat correspond à ces conditions ? » C'est différent de la prédiction du trajet exact par lequel la Terre réelle passera d'un ensemble de conditions au suivant.



Chaque case correspond à une exécution ExoCAM séparée pendant 70 années de modèle, dont les 20 dernières ont été moyennées. L'étude a échantillonné 29 climats stabilisés dans des conditions prescrites d'ensoleillement et de dioxyde de carbone ; elle n'a pas simulé une Terre unique évoluant en continu pendant deux milliards d'années.

The Clean Paper CC BY 4.0

Premier cas limite : assez de dioxyde de carbone, trop de chaleur

Dans la branche de faible altération, le dioxyde de carbone reste fixé à 400 parties par million. À mesure que l'apport solaire augmente, la chaleur devient le facteur limitant.

L'article utilise deux seuils de température moyenne mondiale tirés de travaux antérieurs :

- À **323 kelvins**, soit environ **50 degrés Celsius** en moyenne annuelle mondiale, le monde est considéré comme trop chaud pour la plupart des plantes terrestres. Le modèle atteint ce seuil dans environ **1,68 milliard d'années**.
- À **338 kelvins**, soit environ **65 degrés Celsius** en moyenne annuelle mondiale, le monde est considéré comme trop chaud pour toutes les plantes terrestres. Le modèle atteint ce seuil dans environ **1,87 milliard d'années**.

Ce sont des limites biologiques retenues, non des températures universelles auxquelles tous les organismes photosynthétiques échoueraient nécessairement. Une moyenne mondiale masque aussi de

grandes différences régionales. L'étude examine séparément les régions où certaines combinaisons de température et d'eau pourraient rester favorables, mais une étiquette sur une carte climatique ne peut inventorier tous les futurs refuges ni toutes les adaptations.

Deuxième cas limite : température tolérable, trop peu de dioxyde de carbone

Dans la branche de forte altération, la température moyenne mondiale est maintenue à 288 kelvins, soit environ 15 degrés Celsius, tandis que le dioxyde de carbone atmosphérique diminue. La réponse dépend ici de la quantité minimale de carbone que différentes voies photosynthétiques pourraient utiliser.

- Au seuil traditionnel de **10 parties par million** — 10 molécules de dioxyde de carbone pour un million de molécules atmosphériques —, la limite de la photosynthèse en C4 arrive dans environ **1,35 milliard d'années**. La photosynthèse en C4, utilisée notamment par le maïs et la canne à sucre, concentre le dioxyde de carbone autour de l'enzyme qui le fixe.
- L'emploi d'un autre seuil de **2,9 parties par million** pour les plantes en C4, discuté dans des travaux antérieurs, déplace cette limite à environ **1,64 milliard d'années**.
- Un seuil provisoire de **1 partie par million**, associé à la persistance possible de certaines plantes CAM — des plantes utilisant le métabolisme acide crassulacéen, qui sépare l'absorption nocturne du dioxyde de carbone de son utilisation diurne — ou de plantes aquatiques capables d'utiliser le bicarbonate dissous, la déplace à environ **1,84 milliard d'années**.

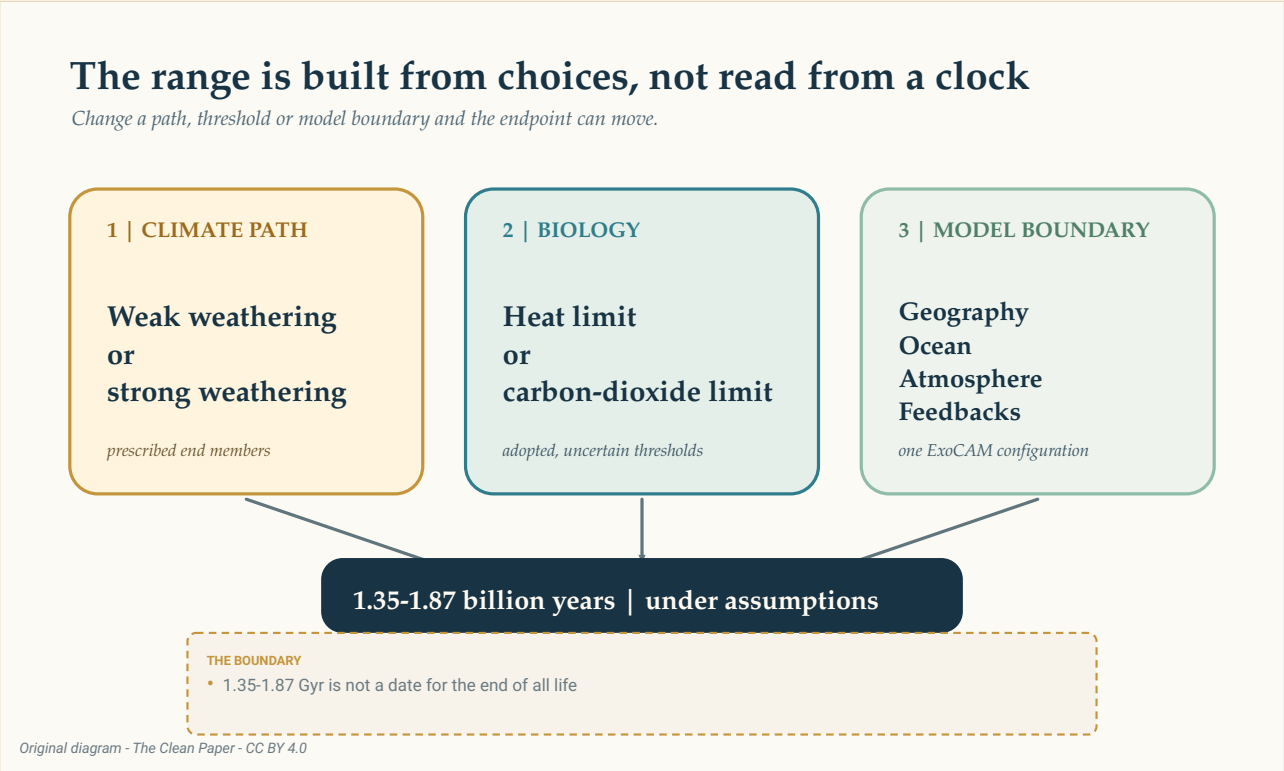
Ce dernier nombre comporte la plus grande réserve biologique. Les auteurs disent explicitement que la limite d'une partie par million est provisoire. Ce n'est pas un seuil de survie établi expérimentalement pour toutes les plantes CAM ou toute la végétation aquatique dans les conditions futures de la Terre.

> **C3, C4 et CAM sont des stratégies, pas une hiérarchie**
>
> Les plantes utilisent différentes voies biochimiques pour capter le carbone. La **photosynthèse en C3** est la plus courante. La **photosynthèse en C4**, utilisée notamment par le maïs et la canne à sucre, concentre le dioxyde de carbone autour de l'enzyme qui fixe le carbone et peut mieux fonctionner lorsque le dioxyde de carbone est rare. Le **métabolisme acide crassulacéen (CAM)** sépare la capture et l'utilisation du carbone entre la nuit et le jour, ce qui aide de nombreuses plantes à économiser l'eau.
> Il s'agit de familles de stratégies présentant de nombreuses différences entre espèces, et non d'une succession de plantes « meilleures ». Les seuils de dioxyde de carbone extrêmement bas utilisés dans l'article sont des hypothèses servant à explorer des limites possibles, et non des garanties qu'un futur écosystème évoluera pour les exploiter.

Pourquoi 1,86 milliard d'années n'est pas une date d'expiration

L'estimation mise en avant dans l'article, environ **1,86 milliard d'années**, est la moyenne des deux bornes supérieures optimistes : 1,84 milliard d'années dans la branche limitée par le dioxyde de carbone et 1,87 milliard d'années dans la branche limitée par la chaleur. C'est un résumé compact de deux scénarios différents. Ce n'est pas un troisième résultat du modèle doté d'une plus grande précision, ni une date constituant la meilleure estimation.

Même la fourchette plus large de 1,35 à 1,87 milliard d'années ne porte pas une probabilité unique. Ses valeurs inférieure et supérieure dépendent d'hypothèses d'altération différentes, de seuils biologiques différents et d'une seule configuration du modèle climatique. La fourchette mesuré les choix de l'expérience autant qu'elle mesure le temps.



La fourchette de 1,35 à 1,87 milliard d'années n'apparaît qu'après le choix d'une trajectoire d'altération, d'un seuil biologique et des limites du modèle. C'est une carte d'hypothèses, pas une horloge aboutissant à l'extinction de toute vie.

The Clean Paper CC BY 4.0

D'autres limites pourraient être atteintes auparavant

Les estimations les plus longues pour la biosphère végétative s'approchent d'une autre frontière incertaine : un effet de serre humide ou divergent qui pourrait entraîner une perte importante des océans. Les modèles climatiques sont largement en désaccord sur le moment où ces états commenceraient

sous un ensoleillement croissant, en particulier loin des conditions actuelles. Certaines estimations les placent avant la limite la plus optimiste de la photosynthèse.

La branche supérieure ne peut donc pas être lue comme la promesse que la Terre conservera ses océans, ses continents familiers ou des conditions de surface habitables jusqu'à 1,87 milliard d'années dans le futur. Le modèle n'inclut pas non plus la tectonique des plaques future, les changements de superficie des terres émergées, l'évolution des écosystèmes ni un océan pleinement dynamique. Ses calculs de l'absorption et de l'émission d'énergie par l'atmosphère sont aussi poussés dans des régimes de rayonnement solaire intense et de dioxyde de carbone extrêmement faible où les modèles divergent.

L'adaptation évolutive et l'intervention technologique apparaissent dans la discussion de l'article comme des possibilités. Elles ne sont pas des résultats des 29 simulations climatiques. Le modèle ne montre pas de futurs organismes évoluant vers une photosynthèse à une partie par million, ni une civilisation gérant l'atmosphère pendant un milliard d'années.

Ce résultat ne concerne pas la crise climatique actuelle

L'augmentation de la luminosité solaire agit sur des centaines de millions à des milliards d'années. Le réchauffement moderne d'origine humaine provient de l'augmentation rapide des gaz à effet de serre sur des décennies et des siècles. Il s'agit de forçages différents, à des échelles temporelles radicalement différentes, qui répondent à des questions différentes.

Rien dans cette étude n'affaiblit les preuves du changement climatique actuel ni ne justifie de retarder l'action. Une biosphère susceptible de conserver un peu de vie photosynthétique dans un scénario de modèle lointain n'est pas la même chose qu'un climat dans lequel les sociétés et les écosystèmes actuels resteraient en sécurité.

L'article est précieux parce qu'il rend une question lointaine plus rigoureuse. Il montre que des modèles antérieurs et plus simples ont peut-être produit trop de réchauffement lorsque l'ensoleillement augmentait à dioxyde de carbone fixe, et que la vie photosynthétique pourrait disposer de davantage de voies de persistance que ne le suggère un unique seuil canonique de carbone. Il montre aussi pourquoi chaque fraction supplémentaire de milliard d'années est liée à une chaîne d'hypothèses.

Le Soleil qui nourrit une feuille change lentement. Que la Terre reste verte pendant encore 1,35, 1,87 ou un autre nombre de milliards d'années dépendra de la réponse conjointe des roches, de l'eau, de l'atmosphère et de la vie. Le résultat honnête n'est pas une date. C'est une vision élargie du compromis.

Résumé clair

Une étude climatique tridimensionnelle demande combien de temps la biosphère végétative — photosynthétique — de la Terre pourrait persister à mesure que le Soleil s'éclaircit lentement.

Les chercheurs ont calculé 29 climats distincts à l'état stationnaire et y ont tracé deux cas limites illustratifs. Avec une faible altération et un dioxyde de carbone fixé à 400 parties par million, les limites de chaleur retenues pour les plantes terrestres surviennent dans environ 1,68 et 1,87 milliard d'années. Avec une forte altération et une température moyenne mondiale fixée à 288 kelvins, soit environ 15 degrés Celsius, les limites de dioxyde de carbone retenues pour la photosynthèse surviennent dans environ 1,35, 1,64 et, avec un seuil provisoire, 1,84 milliard d'années. Le nombre souvent cité de 1,86 milliard d'années n'est que la moyenne arrondie des deux bornes supérieures optimistes. Ce sont des fourchettes de modèle dépendant des scénarios, et non une date à laquelle la Terre, l'humanité ou toute vie prendrait fin. Le modèle utilise des trajectoires prescrites, la géographie actuelle, un océan en couche et aucun couplage explicite sol-végétation ou climat-altération ; ses estimations les plus longues approchent des limites incertaines liées à l'effet de serre et à la perte des océans.

Vérification sans détour

Ce que montre l'article : Dans cette configuration d'ExoCAM, les climats tridimensionnels se réchauffent généralement moins sous un ensoleillement croissant et un dioxyde de carbone fixe que les modèles simplifiés utilisés à titre de comparaison. Pour deux cas limites d'altération prescrits et plusieurs seuils biologiques retenus, les limites de la biosphère végétative se situent entre environ 1,35 et 1,87 milliard d'années dans le futur.

Ce qui est plausible mais non établi : Que certaines plantes CAM ou des plantes aquatiques utilisant du bicarbonate dissous puissent maintenir la photosynthèse près d'une partie par million de dioxyde de carbone atmosphérique ; que l'adaptation ou la technologie puisse prolonger davantage la vie photosynthétique ; et que la trajectoire réelle du couple climat-altération reste entre les deux cas limites du modèle.

Ce que l'article ne montre pas : Une date fixe pour la disparition de toutes les plantes, de toute vie, de la civilisation humaine, des océans terrestres ou de la planète ; une simulation continue unique des deux prochains milliards d'années ; ni aucune raison de minimiser le changement climatique actuel causé par l'humanité.

Principales limites : Vingt-neuf cas à l'état stationnaire issus d'une seule famille de modèles climatiques ; des trajectoires d'altération prescrites plutôt que couplées dynamiquement ; la géographie actuelle ; un océan en couche ; une concentration fixe de méthane ; une obliquité et une excentricité nulles ; aucun sol, aucune végétation ni rétroaction de la biosphère explicites ; des seuils de chaleur et de dioxyde de carbone incertains ; et de larges divergences entre modèles à proximité des conditions d'effet de serre humide ou divergent.

Quel degré de confiance un lecteur non spécialiste devrait-il accorder à ces résultats ? Une confiance élevée dans le fait que l'étude élargit la fourchette plausible des modèles et identifié les hypothèses qui la contrôlent. Une confiance modérée dans la fourchette numérique comme encadrement utile au sein de ce modèle. Une faible confiance dans toute date exacte, car les points les plus éloignés dépendent de trajectoires climatiques volontairement extrêmes et d'une biologie

incertaine.

Sources

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870