

ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

Dans quelle mesure sommes-nous proches du point de basculement de la température de la biosphère terrestre ?

Katharyn A. Duffy^{1,2*}, Christopher R. Schwalm^{2,3}, Vickery L. Arcus⁴, George W. Koch², Liyin L. Liang^{4,5}, Louis A. Schipper⁴

La dépendance à la température de la photosynthèse et de la respiration mondiales détermine la force du puits de carbone terrestre. Alors que le puits terrestre atténue actuellement ~30% des émissions de carbone anthropiques, il n'est pas certain que ce service de l'éco-système persistera et, plus précisément, quelles limites de température strictes, le cas échéant, régulent l'absorption du carbone. Ici, nous utilisons le plus grand réseau de surveillance continue des flux de carbone pour construire les premières courbes de réponse en température dérivées de l'observation pour l'absorption du carbone terrestre mondial. Nous montrons que la température moyenne du trimestre le plus chaud (période de 3 mois) a dépassé le maximum thermique pour la photosynthèse au cours de la dernière décennie. À des températures plus élevées, les taux de respiration continuent d'augmenter, alors que les taux de photosynthèse diminuent fortement. Dans le cadre du maintien du statu quo, cette divergence entraîne une réduction de près de moitié de la force des puits de carbone d'ici 2040.

Quels sont les maxima thermiques de la photosynthèse ($T^{\max}$) et de la respiration-

INTRODUCTION

La différence entre la productivité primaire brute, l'absorption du carbone par la végétation, et la respiration totale de l'écosystème, la perte de carbone dans l'atmosphère, comprend la composante métabolique du puits de carbone terrestre [productivité nette de l'écosystème (NEP)]. À ce jour, les écosystèmes terrestres fournissent un service de régulation du climat en absorbant environ 30 % des émissions anthropiques par an [moyenne $\pm$ 1 SD : 2,6 pétagrammes de carbone (PgC) $\pm$ 0,8 an⁻¹] (1). Alors que la température est un facteur clé des changements annuels du puits de carbone terrestre (2), sa réaction à la température est encore peu limitée à l'échelle du biome à l'échelle mondiale (3, 4), ce qui rend incertaines les conséquences du réchauffement prévu sur le carbone.

Comme tous les processus biologiques, les taux métaboliques de la photosynthèse et de la respiration dépendent de la température ; ils s'accroissent avec l'augmentation de la température, atteignent un taux maximal et diminuent ensuite. Cependant, ces flux de carbone n'ont pas nécessairement la même réponse en termes de température, ce qui peut entraîner de fortes divergences dans le bilan carbone des écosystèmes. Par exemple, l'augmentation des taux de respiration sans augmentation correspondante des taux de photosynthèse diminuerait l'efficacité du puits de carbone terrestre. Une contrainte d'observation sur la différence nette de réponse métabolique entre les deux flux bruts est donc nécessaire de toute urgence pour limiter les projections du futur puits de carbone terrestre et, plus précisément, pour isoler les points de basculement non linéaires et peut-être non réversibles (5). Ceci est particulièrement pertinent étant donné les trajectoires très divergentes des puits de carbone terrestre des modèles du système terrestre (4) qui, néanmoins, s'accordent sur des augmentations futures continues de la force des puits en raison de l'effet de fertilisation du CO₂ (3).

Étant donné les preuves in situ que des régions de la biosphère terrestre connaissent des seuils de température auxquels elles passent d'un puits de carbone à une source (6-8), nous avons posé les questions suivantes : (i)

Copyright © 2021
Les auteurs, certains
droits réservés ;
licencié exclusif
American Association
for the Advancement
of the science.
Aucune revendication
sur les travaux
originaux du
gouvernement
américain. Distribué
sous une licence
Creative Commons
Attribution
NonCommercial
License 4.0 (CC BY-
NC).

imum pour le puits terrestre de carbone ($T^{\max}$) et la fourchette de température moyenne actuelle par rapport à ce seuil critique ? (iii) À quelles températures mondiales et régionales peut-on s'attendre à ce que le puits de carbone terrestre diminue ? (iv) Ces températures se situeront-elles dans un avenir prévisible ?

Pour répondre à ces questions, nous avons utilisé les mesures du plus grand réseau de surveillance continue du carbone, FLUXNET (9), comme contrainte d'observation pour déterminer la dépendance en température des taux globaux de photosynthèse et de respiration. Sur

~Sur environ 1500 années sites de données quotidiennes provenant de tous les principaux biomes et types de fonctions végétales, nous avons appliqué une analyse de corrélation partielle à fenêtre mobile de 30 jours à chaque site de tour de flux pour extraire le signal de température (un changement de photosynthèse ou de respiration uniquement attribuable à des changements de température, c'est-à-dire que le signal exclut d'autres effets climatiques tels que la disponibilité de l'eau et la lumière du soleil) de la productivité primaire brute partitionnée de jour [photosynthèse (P)] et de la respiration totale de l'écosystème (R). Nous avons ensuite tion ($T^{\max}_R$) à l'échelle du biome à l'échelle mondiale ? (ii) Quel est le maximum thermique

normalisé chaque courbe de température au niveau du site et appliqué la théorie du taux macromoléculaire (MMRT) (10) en conjonction avec le rééchantillonnage de Monte Carlo pour éviter le biais de longueur d'enregistrement. Les courbes ont ensuite été agrégées au niveau du biome, puis pondérées par zone pour obtenir une contrainte globale de dépendance à la température (voir Matériels et méthodes). L'EMRM est un cadre fondé sur les principes de la thermodynamique, qui fournit une base mécaniste pour extraire la dépendance des taux de température à travers les échelles, de la cinétique des enzymes individuelles au métabolisme des organismes et des écosystèmes (voir Matériels et méthodes) (11). Ce cadre est basé sur la théorie classique des états de transition de la chimie physique (12) et décrit la dépendance des taux de température à l'aide de trois paramètres, en mettant l'accent sur une température maximale ou optimale.

valeur de la pérennité, $T^{\max}$, au-dessus de laquelle les taux diminuent de manière exponentielle. La fonction d'Arrhenius est un cas particulier de la MMRT où la capacité calorifique

Le terme est zéro et la relation température-taux est exponentielle sans maximum (voir Matériels et méthodes) (10). Le MMRT est

applicable à toute une série de processus et de niveaux d'organisation biologique et a été utilisé avec succès pour modéliser la température

dépendance de la cinétique des enzymes (13), de la croissance microbienne (14), de la respiration du sol (15) et de la respiration des feuilles (16). Ici, nous étendons cette analyse pour inclure la photosynthèse terrestre globale et les flux nets de carbone, en traçant les premières courbes dérivées de l'observation pour la dépendance du métabolisme global du carbone à la température, en utilisant une seule fonction basée sur la thermodynamique.

¹School of Informatics, Computing and Cyber Systems, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ 86011, USA. Center for Ecosystem Science and Society, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ 86011, USA. Woods Hole Research Center, Falmouth, MA 02540, États-Unis. École des sciences, Université de Waikato, Hamilton 3216, Nouvelle-Zélande. Manaaki Whenua-Landcare Research, Private Bag 11052, Palmerston North 4442, Nouvelle-Zélande.

*Auteur correspondant. Courriel : katharyn.duffy@nau.edu

Définitions :

Signal de température : Un changement dans la photosynthèse ou la respiration uniquement attribuable à des changements de température, c'est-à-dire que le signal exclut les autres effets climatiques tels que la disponibilité de l'eau et la lumière du soleil.

Point de basculement : Il s'agit du seuil de température auquel la surface terrestre mondiale passera d'un puits de carbone à une source de carbone lorsque, du seul fait de la température, la photosynthèse est en croissance exponentielle, et la respiration est en augmentation exponentielle.

Les maxima thermiques : Le maximum thermique (T_{max}) représente le pic de la courbe de dépendance de la température où toute augmentation supplémentaire de la température diminuera le taux métabolique de l'une ou l'autre des photosynthèses ou la respiration.

RÉSULTATS

Dans FLUXNET, la réponse en température de la photosynthèse globale montre des maxima distincts (T_{max}) à 18° et 28°C pour les systèmes végétaux C₃ et C₄, respectivement (Fig. 1). Alors que le maximum pour les plantes C₃ est inférieur à l'optima observé dans les mesures au niveau des feuilles (17, 18), nos estimations valident les estimations de T_{max} plus faibles obtenues ailleurs à l'échelle de l'écosystème (19). En outre, nos estimations sont basées sur des am- les prévisions du réchauffement de la planète, qui suivent la température moyenne à la surface du globe plutôt que la température des feuilles, sont donc plus directement liées à la température ambiante et à l'échange total de CO₂ des écosystèmes. En général, les températures des feuilles sont à la fois (i) très variables, même au niveau de chaque plante, et (ii) peu contraignantes à l'échelle du système terrestre, ce qui fait de la température de l'air ambiant une mesure plus appropriée pour étudier les réactions futures. En outre, le maximum que nous pouvons rapporter est dérivé d'observations qui se limitent aux températures subies par les écosystèmes plutôt que de la gamme plus large imposée dans les études en environnement contrôlé.

Contrairement à la photosynthèse, la fréquence respiratoire augmente dans la gamme des températures ambiantes observées par FLUXNET (jusqu'à 38°C) (9), sans qu'il y ait de signe de T_{max} ou de diminution de la fréquence. Utilisation du MMRT sur des manipulations expérimentales de la respiration des feuilles et du sol - ensemble, ~87% de la respiration totale de l'écosystème (20, 21) - démontre que les maxima thermiques de la respiration des feuilles et du sol T_{max} résident à ~60°.

et 70°C, respectivement (15, 16). Ces températures sont bien supérieures aux températures ob-

servies sur les sites des tours (9) et toute projection à court terme dans le cadre de tout scénario de réchauffement (22). Les maxima thermiques élevés de la respiration des feuilles et du sol d'après les données expérimentales sont en accord avec l'augmentation exponentielle du taux observée dans les données FLUXNET à

Duffy et al., Sci. Adv. 2021 ; 7 : eaay1052 13 janvier

Le trimestre le plus chaud (période de 3 mois) s'étend juste après T_{max} (courbe bleue, Fig. 2). Nos courbes de dépendance de la température dérivées de l'observation expliquent à la fois l'important puits actuel de la biosphère (23, 24) et les épisodes documentés de libération rapide de carbone dans l'atmosphère

pendant les températures extrêmes (6-8). Le climat actuel se situe généralement juste en dessous de T_{max} , c'est-à-dire que de légères augmentations de température agissent comme

la fertilisation climatique de l'absorption du carbone par les terres. En raison du réchauffement prévu - comme le laissent présager les extrêmes de température historiques et la perte simultanée de carbone des terres -, de plus en plus de temps sera passé au-dessus de T_{max} . Au-delà de ce seuil, le bilan carbone des terres s'affaiblira d'abord et finira par inverser le signe du puits de carbone à la source de carbone. Ce lien entre le réchauffement prévu et la diminution de l'absorption par les véhicules terrestres est fonction des réponses différentielles des flux bruts à la température. À des températures allant jusqu'au point d'inflexion pour la photosynthèse, la respiration et la photosynthèse sont effectivement "couplées" - les deux processus augmentent avec l'augmentation de la température, bien qu'à des rythmes différents. Cependant, à des températures supérieures au point d'inflexion de la photosynthèse, ces processus sont de plus en plus "découplés". En d'autres termes, le taux d'augmentation ralentit pour la photosynthèse et, au-delà de T_{max} , diminue de manière exponentielle. Dans toute cette gamme de températures, la respiration continue d'augmenter de façon exponentielle. Ce découplage a pour effet de dégrader gravement le puits de carbone terrestre. Il est important de noter que l'extension du quart de T_{max} le plus chaud sur les sites FLUXNET est en grande partie un phénomène récent. Lorsqu'elle est séparée par plus de deux décennies d'observations FLUXNET, la température moyenne du quart le plus chaud a augmenté de 1,8 °C, poussant l'espace climatique actuel au-delà du T_{max} global et donc dans un régime de diminution des taux de photosynthèse (voir Matériels et méthodes). Étant donné que la température moyenne du trimestre le plus chaud dépasse actuellement les estimations de T_{max} , tout réchauffement supplémentaire déplacera le climat moyen au-delà du point d'inflexion de la photosynthèse, ce qui ralentira effectivement l'absorption par les véhicules terrestres et augmentera le temps cumulé au-delà de T_{max} , où la photosynthèse est affectée négativement. Simultanément, le ré

chauffement de la respiration serait presque exponentielle (9, 14-16). Cette intersection (25°C) constitue un puissant point de basculement pour le puits terrestre de carbone et une formidable rétroaction climatique positive (Fig. 2). Actuellement, moins de 10 % de la biosphère terrestre connaît des températures supérieures à T_{max} , où l'absorption du carbone terrestre est dégradée (Fig. 3A). Pour les régions qui connaissent ces températures, l'exposition est limitée à 1 ou 2 mois ou constitue des zones où l'absorption de carbone est faible ou nulle. la végétation. Dans le cadre du maintien du statu quo, d'ici 2100, jusqu'à la moitié des émissions de

de la biosphère terrestre pourrait connaître des températures supérieures au T_{max} , où la photosynthèse est affectée négativement. Simultanément, le ré

chauffement de la respiration serait presque exponentielle (9, 14-16). Cette intersection (25°C) constitue un puissant point de basculement pour le puits terrestre de carbone et une formidable rétroaction climatique positive (Fig. 2). Actuellement, moins de 10 % de la biosphère terrestre connaît des températures supérieures à T_{max} , où l'absorption du carbone terrestre est dégradée (Fig. 3A). Pour les régions qui connaissent ces températures, l'exposition est limitée à 1 ou 2 mois ou constitue des zones où l'absorption de carbone est faible ou nulle. la végétation. Dans le cadre du maintien du statu quo, d'ici 2100, jusqu'à la moitié des émissions de

température ambiante (fig. S1 et voir Matériels et méthodes) et bien supérieurs à ceux de la photosynthèse en C₃ et C₄. Les températures où la photosynthèse commence à décliner sont en accord avec l'augmentation la plus forte des taux de respiration pour tous les ensembles de données considérés (9, 15, 16). De petits changements

de température au-delà de ce point montrent des tendances opposées dans les taux de photosynthèse et de respiration. La grande disparité entre les valeurs de $T^{\max}$ pour la photosynthèse et la respiration (autotrophe et hétérotrophe combinées) implique que les réponses de flux divergent à tem-

peratures supérieures à $T^{\max}$ et que le déséquilibre s'accroît avec l'augmentation de la température.

Comme les deux flux bruts dépendent de la température, nous utilisons le bilan massique pour déterminer la température optimale de l'absorption nette de carbone par les terres ($T^{\max}$) et nous constatons qu'actuellement, la température moyenne de l'atmosphère est de 1,5 °C.

une augmentation de trois à cinq fois, en fonction de l'incertitude des projections de température, par rapport aux niveaux actuels (Fig. 3, B et C). Cependant, l'impact des températures élevées sur les terres émergées est plus qu'une fonction de la superficie cumulée. Les biomes qui recyclent 40 à 70 % de tout le carbone terrestre (19), y compris les forêts tropicales humides de l'Amazonie et de l'Asie du Sud-Est et les forêts de la taïga de Russie et du Canada, sont parmi les premiers à dépasser le $T^{\max}$ spécifique à la biomasse pendant la moitié de l'année ou plus. Cette réduction de la force des puits terrestres est en fait concentrée en amont, puisqu'une perte de 45 % se produit au milieu du siècle, avec seulement une perte supplémentaire de 5 % à la fin du siècle (Fig. 3D). En outre, ces estimations sont conservatrices car elles supposent une récupération complète de la végétation après un stress thermique et ignorent les modèles et les retards de récupération (25).

DISCUSSION

Nos résultats démontrent les limites de température pour les taux de photosynthèse globale et le puits terrestre dans son ensemble. Malgré deux

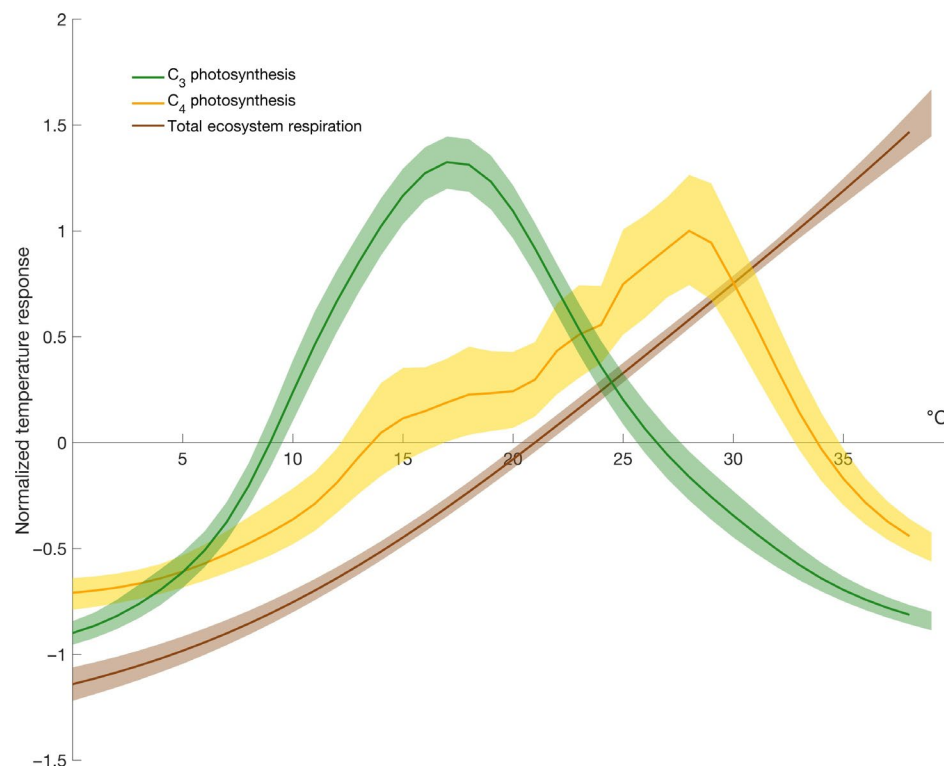


Fig. 1. Dépendance de la température des flux de carbone mondiaux. La réponse à la température mondiale normalisée de la photosynthèse C_3 (vert), qui présente une T_{max} de 18°C, de la photosynthèse C_4 (jaune) qui présente une T_{max} à 28°C, et de la respiration totale de l'écosystème (brun), dérivée de l'ensemble de données de synthèse de FLUXNET 2015. Les optima thermiques mineurs observés dans les sites classés C_4 valident la nature mixte C_3/C_4 de certains écosystèmes et s'expliquent bien par la somme de deux courbes gaussiennes (voir Matériaux et Méthodes). Tous les flux ont été normalisés et ajustés aux températures ambiantes observées par FLUXNET (jusqu'à 38°C), où la moyenne de chaque courbe est égale à zéro. Les zones ombrées représentent l'intervalle de confiance à 90 % des projections.

décennies d'observation de FLUXNET et la décennie la plus chaude jamais enregistrée, nous n'avons observé aucune preuve d'acclimation dans la photosynthèse (voir Matériaux et méthodes et fig. S2). Bien qu'il soit possible que l'adaptation de la température puisse atténuer l'ampleur de cet impact, étant donné la forte variation quotidienne, saisonnière et interannuelle de la température, par opposition au réchauffement uniforme des données expérimentales, la probabilité de détecter une acclimation est faible. En outre, deux décennies est probablement une période trop courte pour voir la sélection de génotypes avec une tolérance plus élevée à la température, en particulier dans les systèmes dominés par des plantes pérennes (16-28). Étant donné la proximité actuelle du T^{max} sans qu'aucune acclimation ne soit observée, il est peu probable que l'acclimation se fasse à une vitesse suffisante pour compenser les baisses de température (29).

Au-delà de l'acclimation, et malgré une augmentation de ~40-ppmv (parties par million en volume) de CO_2 par rapport à l'enregistrement FLUXNET de 1991-2015, nous n'avons également observé aucune altération notable de l'ampleur de la photosynthèse dans l'ensemble de l'enregistrement (fig. S3). Nous notons que, sur la base de la solubilité du CO_2 en fonction de la température et de la pression, l'affinité des feuilles pour le CO_2 est pratiquement inchangée dans l'ensemble des données (30). Nous soutenons donc que, contrairement à tout effet de fertilisation du CO_2 (3), les températures plus élevées prévues associées à un taux élevé de CO_2 pourraient dégrader l'absorption du carbone par les terres et que le fait de ne pas en tenir compte entraîne une

surestimation grossière de l'atténuation du changement climatique fournie par la végétation terrestre. Nous notons que des travaux futurs tenant compte du moment de l'activité photosynthétique (31), des concentrations de CO_2 et de la solubilité du CO_2 en fonction de la température (30) seront essentiels pour prédire avec précision le rôle de la fertilisation du CO_2 dans le puits de carbone terrestre (32).

Le point de basculement de la température de la biosphère terrestre ne se situe pas à la fin du siècle ou au-delà, mais dans les 20 à 30 prochaines années (figures 2 et 3, A à D). Étant donné les limites de température de l'absorption du carbone par les terres présentées ici, sans atténuation du réchauffement, nous franchirons le seuil de température des biomes les plus productifs d'ici le milieu du siècle, après quoi le puits terrestre ne se dégradera plus qu'à environ 50 % de sa capacité actuelle si l'adaptation ne se produit pas. Si les biomes finiront par se déplacer dans l'espace en réponse au réchauffement, ce processus ne sera probablement pas une migration en douceur, mais plutôt une perte rapide des biomes actuels due à des perturbations (avec des émissions supplémentaires de carbone dans l'atmosphère), suivie d'un établissement plus lent de biomes mieux adaptés au climat émergent. En outre, l'établissement de nouveaux biomes ne sera probablement pas complet sans intervention humaine et sera limité par des facteurs édaphiques, notamment la disponibilité des nutriments. Cela suggère en outre que nous entrons rapidement dans des régimes de température où la productivité de la biosphère diminuera de façon précipitée et remet en question la viabilité future du puits de carbone, ainsi que les contributions nationales déterminées prévues dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat, car celles-ci dépendent fortement de l'absorption de carbone par les terres pour remplir les engagements pris (33). Contrairement à la voie de concentration représentative 8.5 (RCP8.5), le réchauffement associé au scénario RCP2.6 pourrait permettre d'atteindre des niveaux de productivité de la biosphère proches des niveaux actuels, en préservant la majeure partie de l'absorption de carbone par les terres (~10 à 30% de perte). La non-application des accords qui respectent ou dépassent les limites de l'accord de Paris pourrait modifier quantitativement le puits de carbone terrestre important et persistant dont nous dépendons actuellement pour atténuer les émissions anthropo-géniques de CO_2 et donc le changement environnemental mondial.

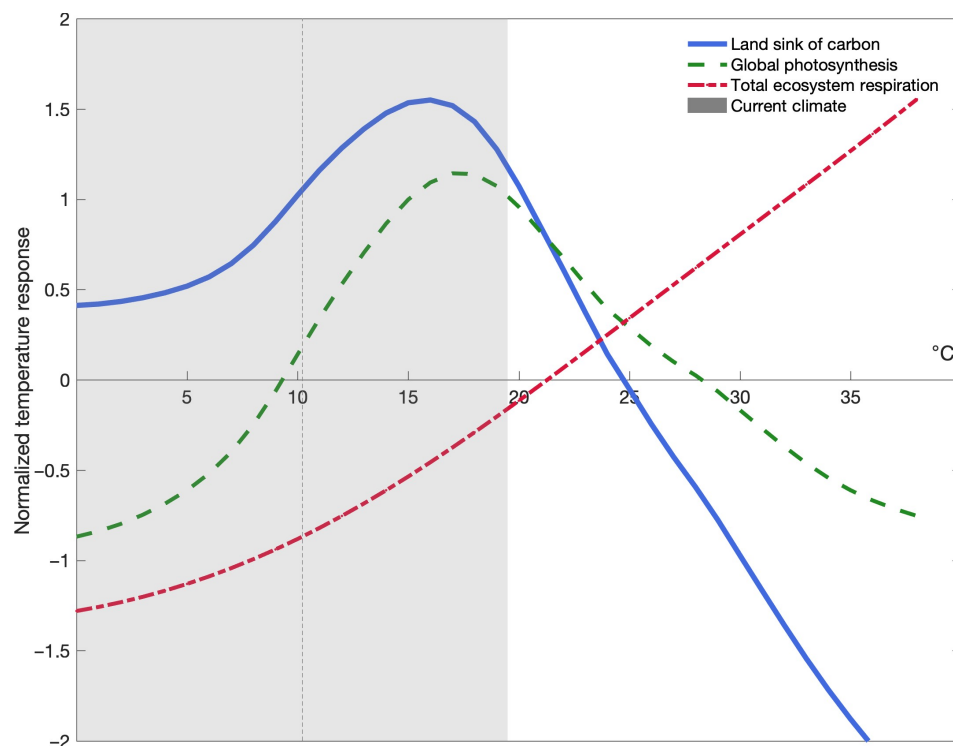


Fig. 2. Dépendance du puits de carbone terrestre vis-à-vis de la température. Courbes intégrées de réponse à la température mondiale pour la photosynthèse normalisée (ligne pointillée verte), la respiration (ligne pointillée rouge), et une estimation du bilan de masse du puits terrestre (ligne bleue continue) par rapport au climat actuel (barre grise), où la moyenne de chaque courbe est égale à zéro. La photosynthèse représente l'intégration des courbes C_3 et C_4 (Fig. 1) pondérées par la fraction globale de la photosynthèse C_3/C_4 (37). La barre grise représente la gamme des températures annuelles moyennes observées de 1991 à 2015 (9, 22), et la ligne verticale en pointillés indique la température annuelle moyenne actuelle aux sites des tours FLUXNET.

LES MATÉRIAUX ET LES MÉTHODES

Théorie du taux macromoléculaire

Le MMRT est basé sur la théorie classique des états de transition qui décrit la dépendance en température de la cinétique des réactions chimiques en utilisant la thermodynamique statique (6). L'un des principaux éléments du MMRT est la

taux, $\Delta C_p^\ddagger$ la différence de capacité thermique entre l'enzyme-la reconnaissance de la modification de la capacité thermique des le complexe substrat (ES) et l'état de transition enzymatique (E-TS)

complexe. La capacité thermique des grandes macromolécules telles que les enzymes est fonction de la distribution des modes de vibration du système.

Pour le MMRT, le terme de capacité thermique est intégré dans l'équation de Eyring pour donner l'équation 1 ci-dessous. La signature résultante du TEMM est un graphique courbe de la vitesse en fonction de la température en l'absence de dénaturation. $\Delta C_p^\ddagger$ détermine la courbure d'une telle courbe, et un important

composante de $\Delta C_p^\ddagger$ est le changement de la distribution des modes vibratoires dans chaque état le long de la coordonnée de réaction (complexes ES et E-TS) (34)

entre les complexes ES et E-TS ($\Delta C_p^\ddagger$). Ainsi, la première dérivée de la TEMM quantifie le changement de taux (k) par rapport au changement de température (T), donné dans l'équation 2

$$\Delta C_p^\ddagger + \Delta C_p^\ddagger (T - T_0)$$

$$\frac{dT}{dk} = \frac{(T - T_0) R T^2}{\Delta C_p^\ddagger - 1 + P} \quad (2)$$

Nous avons déjà démontré que la TRMM décrit avec précision la dépendance des taux biologiques à la température à des niveaux de complexité croissants [taux de croissance microbienne (14), respiration du sol (15) et respiration des plantes (16)]. Cela justifie l'utilisation de la RMT pour l'analyse de la dépendance à la température des flux des écosystèmes dans l'ensemble de données FLUXNET.

Données et traitement FLUXNET

En tant qu'ensemble de données d'observation de la dépendance des flux de carbone terrestres à la

température, les estimations quotidiennes moyennes des flux de carbone et les variables micro-météorologiques ont été extraites de

$$k = \frac{k_B T}{-h} e^{\frac{\Delta H^\ddagger}{RT} - \frac{\Delta S^\ddagger}{R}} = \frac{k_B T}{-h} e^{\left[\frac{\Delta H^\ddagger(T-T_0)}{RT} + \frac{\Delta C_p^\ddagger(\ln T - \ln T_0)}{R} \right]} \quad (1)$$

L'équation 1 (basée sur la théorie de l'état de transition) est au cœur de la TRM. Elle décrit le taux (k) en fonction des constantes de Boltzmann, de Planck et des constantes universelles du gaz (k_B , h et R , respectivement), de la température absolue (T), du coefficient de transmission (κ), de la variation de l'enthalpie $\Delta H^\ddagger_0$ et de l'entropie ($\Delta S^\ddagger_0$) entre le sol et la transition

FLUXNET 2015

ensemble de données de synthèse pour tous les sites de niveau 1 et de niveau 2, ainsi que l'incertitude des estimations basées sur le comblement des lacunes et l'écart-type des flux (35). Le jour

a été sélectionné pour les estimations de la productivité primaire brute (P) et de la respiration totale de l'écosystème (R) afin de minimiser le biais associé à la limitation de la réponse en température des flux partitionnés par les températures nocturnes (36). Des estimations simultanées de la température de l'air, de la chaleur latente et sensible, et du flux de rayonnement à ondes courtes descendantes ont également été extraites, ainsi que des mesures des écarts

à une température de référence (T_0), et la variation de la capacité thermique remplissage de flux et de données météorologiques.

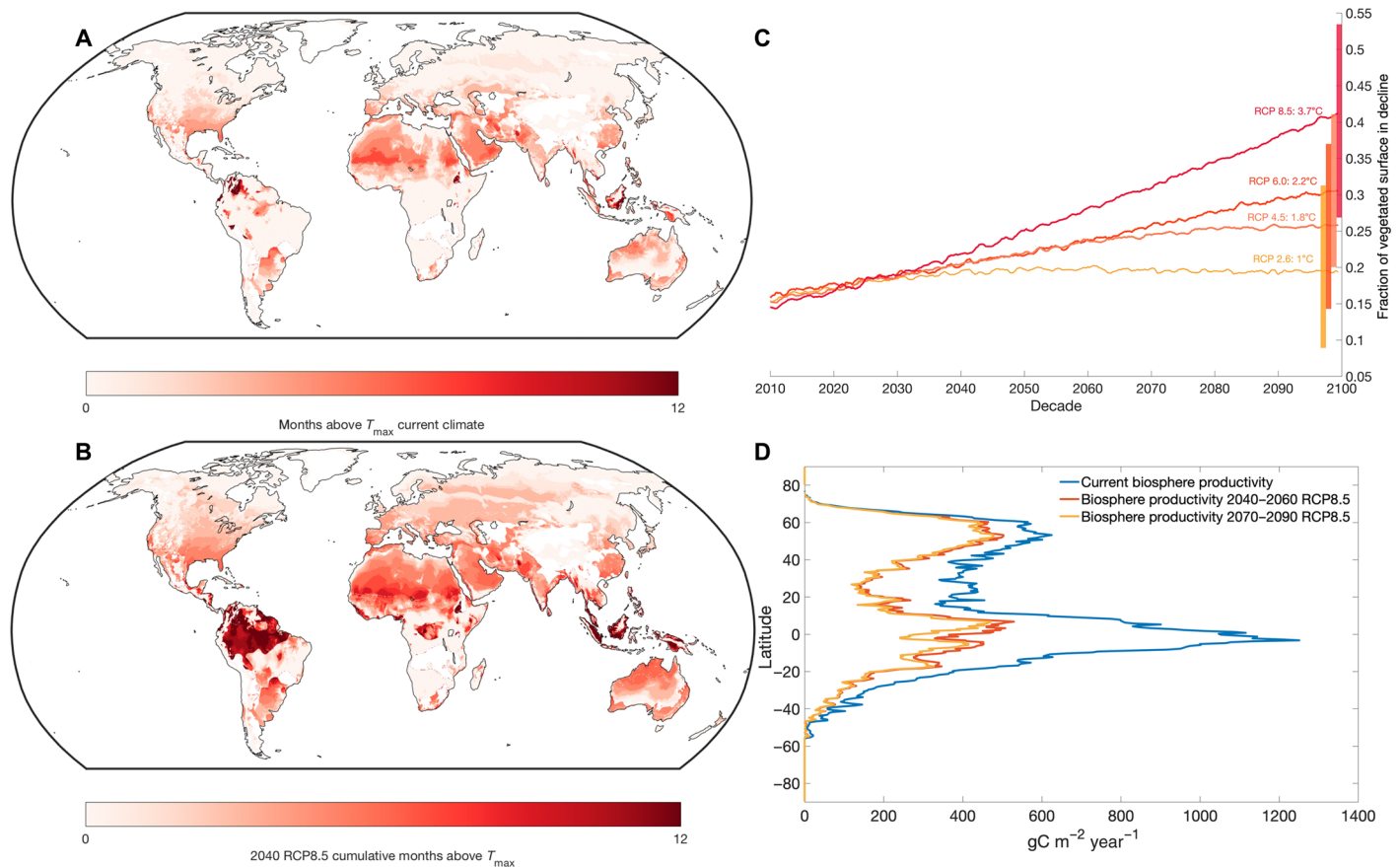


Fig. 3. Modèles spatiaux des points de basculement de la température pour la biosphère. (A) Dose mensuelle cumulative actuelle de température supérieure à T_{max} par biôme (voir Matériaux et

Méthodes) basées sur les données de WorldClim 1950-2010 (22). (B) Dose cumulée de température supérieure à T_{max}

sur la base des données de WorldClim (22). (C) Fraction cumulée de la biosphère terrestre en dépassement de T_{max} par scénario de PCR basé sur les données mensuelles moyennes multimodèles de la phase 5 du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP5). Les barres verticales représentent une intégration de l'incertitude sur les projections des membres de l'ensemble CMIP5 pour les changements de température, traduite en une plage de dépassement de T_{max} pour la surface végétalisée. (D) Moyenne actuelle de la photosynthèse brute quadrillée (2003-2013) (38) ainsi que les réductions de la biosphère pour 2040-2060 (réduction de 44 %) et 2070-2090 (réduction de 49 %) sur la base des données CMIP5 (22).

La chaleur combinée, latente et sensible, a été utilisée pour calculer la fraction évaporative (FE), l'inverse du rapport Bowen, et un indice d'aridité basé de la disponibilité relative de l'eau dans la biosphère (Eq. 3) (37)

$$EF = \frac{E}{E + R} \quad (3)$$

où E représente la chaleur latente (watts par mètre carré) et R représente la chaleur sensible (watts par mètre carré).

L'EF est une mesure efficace pour évaluer la disponibilité de l'eau car elle capte le signal d'une multitude de réservoirs d'eau potentiels (par exemple, l'humidité du sol et les précipitations) par le biais des flux évapotranspiratifs de la biosphère et s'échelonne bien à l'échelle mondiale. Nous avons également évalué le signal du déficit de pression de vapeur (VPD) comme autre mesure du stress

Signal de température

On sait que la photosynthèse et la respiration sont toutes deux contrôlées par un certain nombre de variables enviroclimatiques, à savoir la lumière du soleil, l'eau et la température. Pour isoler le signal de température, nous avons utilisé une analyse de corrélation partielle à fenêtre mobile de 30 jours sur des estimations quotidiennes de la productivité primaire brute et la respiration totale de l'écosystème réparties sur la journée, avec l'EF, le rayonnement descendant à ondes courtes et la température de l'air de 0° à 38°C (à partir de la température biologiquement pertinente hydrique, mais n'avons constaté aucune altération statistiquement significative de la réponse (fig. S4). Étant donné les grandes variations de productivité et de climat entre les biomes, nous avons normalisé tous les flux de carbone ainsi que les variations micrométéorologiques au sein du site pour éviter les signaux basés sur la biogéographie. Pour maintenir la dérivation in situ de la dépendance à la température, les flux de carbone et les données de température qui étaient totalement lacunaires ont été exclus de l'analyse.

pour l'activité métabolique à la limite supérieure de l'enregistrement FLUXNET) comme variables explicatives au niveau du site individuel, et filtré pour les relations significatives à $P < 0,1$. Le résultat a été la proportion de variation des flux bruts qui étaient uniquement attribuables à chaque variable enviroclimatique. Nous avons ensuite normalisé et ajusté la réponse en température des deux flux par site à la première dérivée de la RMT (11) pour étudier les changements du métabolisme en fonction de la température (équations 1 et 2). Comme le MMRT a été ajusté au niveau du site et ensuite bootstrapé, nous avons filtré l'ensemble de données de synthèse FLUXNET pour les tours qui avaient $n > 10$ points de données statistiquement attribués pour s'assurer que les données étaient suffisantes pour contraindre la courbure de la réponse à la température. Les projections de température du MMRT ont été limitées à la fenêtre de température ambiante des observations de l'enregistrement FLUXNET (0° à 38°C, la limite supérieure des observations FLUXNET).

T_{max} ou détermination du point de basculement

Deux points importants existent dans les courbes de dépendance de la température pour le métabolisme de la biosphère : le point d'inflexion (T^{inf}) et le thermique maximum (T^{max}). Le point d'inflexion des taux dépendant de la température représente les températures où une augmentation du taux (k) est maximal par rapport à la température (T) et indique où les taux passent de convexe à concave. T^{inf} représente donc la température à laquelle l'absorption de carbone par le sol est maximale. Le maximum thermique (T_{max}) représente le sommet de la courbe de dépendance de la température où toute augmentation supplémentaire de la température diminuera les métabolismes. Ici, nous définissons T^{max} pour le puits terrestre (T^{max}_{PR}) comme la masse

différence d'équilibre entre T^{max}_{PR} et T^{max}_{NEP} .
PR

Représentativité et incertitude des données de FLUXNET

Deux défis majeurs existent pour la contrainte globale de la biosphère métabolisme en utilisant l'ensemble de données FLUXNET : (i) Les observations sont inégalement réparties sur la surface de végétation, avec des durées d'enregistrement différentes, et (ii) en raison de la nature ambiante et mixte des observations des tours, les données sont intrinsèquement bruyantes. L'ensemble de données FLUXNET, cependant, s'est avéré statistiquement représentatif des types fonctionnels de plantes et des biomes de Köppen-Geiger à l'échelle mondiale, ce qui suggère que les analyses statistiques s'appuyant sur les observations FLUXNET sont robustes (38).

Pour relever les défis (i) et (ii), nous avons conçu une méthode bootstrap qui échantillonne des enregistrements de tours entières plutôt que des observations (pour éviter la longueur du biais d'enregistrement) afin d'ajuster les courbes globales pour la dépendance de la température des flux de carbone terrestre. Nous avons ensuite calculé le bootstrap à

Évaluation de la fertilisation au CO_2 et du VPD

Pour évaluer l'effet du CO_2 sur la dépendance à la température de la production primaire brute et la capacité de la fertilisation au CO_2 à contrer les baisses d'absorption du carbone par les terres induites par la température, nous avons effectué une deuxième analyse de corrélation partielle à fenêtre mobile qui a inclus le CO_2 ambiant des tours FLUXNET, tous les autres composants restant identiques. Alors qu'une augmentation d'environ 1 % par an de la PEN a été corrélée avec un taux élevé de CO_2 ailleurs dans la littérature (32), les intervalles de confiance à 90 % du signal de dépendance de la température avec et sans CO_2 inclus n'ont montré aucune différence statistiquement significative (fig. S3). Un modèle identique a été réalisé, en remplaçant le VPD par

EF pour évaluer les changements potentiels de la réponse à la température sur la base

la demande atmosphérique plutôt que le flux d'eau, ce qui montre une

fois de plus l'absence de différences significatives (fig. S3).

Grille spatiale

Pour générer des grilles spatiales de réponse aux températures, les sites FLUXNET ont été agrégés sur la base des régions de classification climatique Koeppen-Geiger où l'ensemble de données de synthèse FLUXNET a conservé une couverture de plus de 5 sites. Nous avons regroupé les classes ne présentant pas une répartition suffisante au niveau suivant de l'organisation climatologique. La

à travers les latitudes (fig. S2) pour saisir l'incertitude découlant de la rareté des données et de l'hétérogénéité des écosystèmes échantillonnés.

Bootstrapping et dichotomie C / C

3 4
résolution de 2,5

Les premières recherches sur la réponse en température de la photosynthèse à l'échelle mondiale ont démontré une distribution bimodale claire qui s'explique bien par les heuristiques C_3 et C_4 (39). Tous les sites FLUXNET ont donc été dichotomisés en ces deux groupes sur la base de critères climatiques (40). La réponse de la température par groupe a ensuite été bootstrapée 10 000 fois sur l'ensemble des données de synthèse de FLUXNET, de sorte que la courbe de température d'un site entier a été échantillonnée plutôt que des observations spécifiques, ce qui a permis de réduire le biais de la longueur d'enregistrement et la distribution inégale dans l'espace bioclimatique de certains sites à longue durée de vie.

Signal de température respiratoire

La réponse exponentielle de type Arrhenius de la respiration totale de l'écosystème est largement fonction des observations de la température ambiante, où FLUXNET échantillonne effectivement des températures bien inférieures à $T^{\max}$ pour une respiration contrainte par des données expérimentales (15, 16) et largement dans le point d'inflexion de ce processus (fig. S1). Ce comportement est en plein accord avec le MMRT, où, pour des valeurs $\Delta C^{\ddagger}$ proches de zéro, le MMRT prédit un comportement de type Arrhenius. Afin de mettre en évidence la disparité de $T^{\max}$ entre la photosynthèse brute (P) et la respiration totale de l'écosystème (R) et d'illustrer la concordance entre les données FLUXNET ajustées à la température ambiante et les données expérimentales à plus grande échelle, nous avons intégré deux ensembles de données récentes sur la réponse de la température respiratoire (10, 11), qui permettent d'observer $T^{\max}$ (fig. S1). Les maxima thermiques de la respiration des feuilles et du sol de ces données se situent à $\sim 60^\circ$ et 70°C , respectivement, en alignement avec les prévisions de FLUXNET à température ambiante et bien au-dessus de l'un ou l'autre type de photosynthèse (fig. S1).

maximum a ensuite été quadrillé spatialement sur la base de la classification climatique de Koeppen-Geiger (fig. S4).

Dose cumulée de température et fraction de la surface végétalisée en déclin

L'intérêt de notre travail réside dans la quantité cumulative de températures mensuelles moyennes supérieures à $T^{\max}$ au cours d'une année donnée. Pour mesurer

nous avons utilisé la grille T_p dérivée de FLUXNET, WorldClim 2 à

Résolution spatiale de 10 minutes pour le climat actuel et WorldClim

1.4 données de la phase 5 du projet de comparaison des modèles couplés à échelle réduite (CMIP5) à une résolution spatiale de 10 minutes (Fig. 3, A et B) (22), et les données mensuelles CMIP5 pour tous les scénarios RCP à une

(Fig. 3C). Nous avons ensuite calculé cumulativement les données de température moyenne mensuelle qui dépassaient $T^{\max}$ pour les ensembles de données climatiques actuelles et futures. Sur la base des données mensuelles du CMIP5, nous avons calculé le cumul-nombre de mois au-delà de $T^{\max}$ et les a pondérés par zone pour évaluer la fraction des terres terrestres qui s'enfoncent en déclin (Fig. 3C).

Diminution de la productivité de la biosphère RCP8.5

Comme la productivité de la biosphère varie dans l'espace, nous avons intégré des données FLUXNET à plus grande échelle pour évaluer les impacts du dépassement du $T^{\max}$ sur la productivité totale de la biosphère terrestre (38). Pour éviter les biais dus à la variabilité interannuelle, nous avons calculé la productivité moyenne de la biosphère entre 2003 et 2013 et évalué la température de dépassement sur la base de notre grille $T^{\max}$ pour évaluer le nombre de mois pendant lesquels chaque cellule de la grille devrait se situer en dessous ou au-dessus de ce seuil pour le métabolisme de la biosphère, de sorte que les pixels, qui n'ont pas été touchés, ont contribué à l'estimation de la productivité totale du biome, et les biomes, qui ont passé toute l'année au-delà de $T^{\max}$, n'en ont pas contribué.

Acclimatation

Pour rechercher des preuves de l'acclimatation à l'échelle de l'écosystème à la planète, nous avons d'abord isolé les sites des tours FLUXNET qui couvraient à la fois la première et la deuxième décennie de l'ensemble des données de synthèse de 2015. Nous avons ensuite évalué les courbes de dépendance de la température sur les deux décennies pour rechercher des décalages vers le haut de $T^{\max}$ (fig. S2). Bien qu'il existe des preuves ailleurs dans la littérature soutenant un changement de l'optima thermique à des températures plus élevées pour les plantes individuelles, nous n'avons trouvé aucune preuve de cette acclimatation à l'échelle de l'écosystème à l'échelle mondiale.

Disponibilité des données

L'accès aux données de FLUXNET dépend du niveau de données utilisé. Les données de niveau 1 sont ouvertes et gratuites à des fins scientifiques et éducatives, et leur utilisation suit la politique d'utilisation équitable accessible à l'adresse <https://fluxnet.fluxdata.org/data/data-policy/>. Les données de niveau 2 proviennent de producteurs qui ne sont actuellement pas en mesure de partager leurs données de manière ouverte et qui ont besoin d'une proposition approuvée pour l'accès aux données. Des informations sur les propositions d'accès aux données sont disponibles à l'adresse <https://fluxnet.fluxdata.org/>. Une liste des sites FLUXNET des niveaux 1 et 2 utilisés dans cette analyse se trouve dans le tableau S3. Les données climatiques WorldClim CMIP5 à échelle réduite utilisées pour évaluer le climat futur et donc l'espace climatique au-delà de T_{max} sont disponibles gratuitement sur <http://worldclim.org/CMIP5v1>. Les données FLUXNET à échelle supérieure utilisées pour évaluer la productivité actuelle et future de la bio-sphère affectée par la température sont disponibles gratuitement sur www.fluxcom.org/.

DOCUMENTS COMPLÉMENTAIRES

Des informations complémentaires pour cet article sont disponibles sur <http://advances.sciencemag.org/cgi/content/full/7/3/eaay1052/DC1>

RÉFÉRENCES ET NOTES

1. T. F. Keenan, I. C. Prentice, J. G. Canadell, C. A. Williams, H. Wang, M. Raupach, G. J. Collatz, Recent pause in the growth rate of atmospheric CO_2 due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nat. Commun.* **7**, 13428 (2016).
2. O. Schneising, M. Reuter, M. Buchwitz, J. Heymann, H. Bovensmann, J. P. Burrows, Puits de carbone terrestre observé depuis l'espace : Variation des taux de croissance et des amplitudes des cycles saisonniers en réponse à la variabilité interannuelle des températures de surface. *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 133-141 (2014).
3. D. N. Huntzinger, A. M. Michalak, C. Schwalm, P. Ciais, A. W. King, Y. Fang, K. Schaefer, Y. Wei, R. B. Cook, J. B. Fisher, D. Hayes, M. Huang, A. Ito, A. K. Jain, H. Lei, C. Lu, F. Maignan, J. Mao, N. Parazoo, S. Peng, B. Poulter, D. Ricciuto, X. Shi, H. Tian, W. Wang, N. Zeng, F. Zhao, L'incertitude quant à la réaction du puits de carbone terrestre aux facteurs environnementaux compromet les prévisions de rétroaction carbone-climat. *Rep. sci.* **7**, 4765 (2017).
4. P. Friedlingstein, M. Meinshausen, V. K. Arora, C. D. Jones, A. Anav, S. K. Liddicoat, R. Knutti, Incertitudes dans les projections climatiques CMIP5 dues aux rétroactions du cycle du carbone. *J. Climate* **27**, 511-526 (2013).
5. T. M. Lenton, H. Held, E. Kriegler, J. W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf, H. J. Schellnhuber, Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105**, 1786-1793 (2008).
6. P. Ciais, M. Reichstein, N. Viovy, A. Granier, J. Ogée, V. Allard, M. Aubinet, N. Buchmann, C. Bernhofer, A. Carrara, F. Chevallier, N. de Noblet, A. D. Friend, P. Friedlingstein, T. Grünwald, B. Heinesch, P. Keronen, A. Knohl, G. Krinner, D. Loustau, G. Manca, G. Matteucci, F. Miglietta, J. M. Ourcival, D. Papale, K. Pilegaard, S. Rambal, G. Seufert, J. F. Soussana, M. J. Sanz, E. D. Schulze, T. Vesala, R. Valentini, European-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**, 529-533 (2005).
7. E. van Gorsel, S. Wolf, J. Cleverly, P. Isaac, V. Haverd, C. Ewenz, S. Arndt, J. Beringer, V. Resco de Dios, B. J. Evans, A. Griebel, L. B. Hutley, T. Keenan, N. Kijun, C. Macfarlane, W. S. Meyer, I. McHugh, E. Pendall, S. M. Prober, R. Silberstein, Carbon uptake and water use in woodlands and forests in southern Australia during an extreme heat wave event in the "Angry Summer" of 2012/2013. *Biogeosciences* **13**, 5947-5964 (2016).
8. S. Guerlet, S. Basu, A. Butz, M. Krol, P. Hahne, S. Houweling, O. P. Hasekamp, I. Aben, Réduction de l'absorption du carbone par le GOSAT pendant l'été 2010 dans l'hémisphère nord. *Géophys. Res. Lett.* **40**, 2378-2383 (2013).

Duffy et al., *Sci. Adv.* 2021 ; 7 : eaay1052 13 janvier

9. fluxdata.org, *Traitement des données* (<http://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/data-processing/>), vol. 2018.
10. V. L. Arcus, E. J. Prentice, J. K. Hobbs, A. J. Mulholland, M. W. van der Kamp, C. R. Pudney, E. J. Parker, L. A. Schipper, On the temperature dependence of enzyme-catalysed rates. *Biochemistry* **55**, 1681-1688 (2016).
11. L. A. Schipper, J. K. Hobbs, S. Rutledge, V. L. Arcus, La théorie thermodynamique explique l'optima de température des processus microbiens du sol et les valeurs élevées de Q_{10} à basse température. *Glob Change Biol.* **20**, 3578-3586 (2014).
12. J. K. Hobbs, W. Jiao, A. D. Easter, E. J. Parker, L. A. Schipper, V. L. Arcus, Changement de chaleur La capacité de catalyse enzymatique détermine la dépendance à la température des taux catalysés par les enzymes. *ACS Chem. Biol.* **8**, 2388-2393 (2013).
13. E. J. Prentice, J. Hicks, H. Ballerstedt, L. M. Blank, L. L. Liang, L. A. Schipper, V. L. Arcus, The inflection point hypothesis : La relation entre la dépendance de la température de

- les taux de réaction catalysés par les enzymes et les taux de croissance microbienne. *Biochemistry* **59**, 3562-3569 (2020).
14. C. J. Alster, P. Baas, M. D. Wallenstein, N. G. Johnson, J. C. von Fischer, Temperature sensitivity as a microbial trait using parameters from macromolecular rate theory. *Avant. Microbiol.* **7**, 1821 (2016).
 15. J. M. Robinson, T. A. O'Neill, J. Ryburn, L. L. Liang, V. L. Arcus, L. A. Schipper, Mesure rapide en laboratoire de la dépendance de la respiration du sol à la température et application à des changements dans trois sols différents au cours de l'année. *Biogéochimie* **133**, 101-112 (2017).
 16. L. L. Liang, V. L. Arcus, M. A. Heskell, O. S. O'Sullivan, L. K. Weerasinghe, D. Creek, J. J. G. Egerton, M. G. Tjoelker, O. K. Atkin, L. A. Schipper, La théorie du taux macromoléculaire (MMRT) fournit une justification thermodynamique pour étayer la réponse convergente de la température dans la respiration des feuilles des plantes. *Glob. Chang. Biol.* **24**, 1538-1547 (2018).
 17. S. J. Crafts-Brandner, M. E. Salvucci, l'activase Rubisco limite le potentiel photosynthétique des feuilles à haute température et au CO₂. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **97**, 13430-13435 (2000).
 18. G. V. Farquhar, S. von Caemmerer, J. A. Berry, A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* **149**, 78-90 (1980).
 19. M. Huang, S. Piao, P. Ciais, J. Peñuelas, X. Wang, T. F. Keenan, S. Peng, J. A. Berry, K. Wang, J. Mao, R. Alkama, A. Cescatti, M. Cuntz, H. de Deurwaerder, M. Gao, Y. He, Y. Liu, Y. Luo, R. B. Myneni, S. Niu, X. Shi, W. Yuan, H. Verbeeck, T. Wang, J. Wu, I. A. Janssens, Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 772-779 (2019).
 20. M. G. Ryan, B. E. Law, Interprétation, mesure et modélisation de la respiration du sol. *Biogeochemistry* **73**, 3-27 (2005).
 21. O. K. Atkin, K. J. Bloomfield, P. B. Reich, M. G. Tjoelker, G. P. Asner, D. Bonal, G. Bönsch, M. G. Bradford, L. A. Cernusak, E. G. Cosio, D. Creek, K. Y. Crous, T. F. Domingues, J. S. Dukes, J. J. G. Egerton, J. R. Evans, G. D. Farquhar, N. M. Fyllas, P. P. G. Gauthier, E. Gloor, T. E. Gimeno, K. L. Griffin, R. Guerrieri, M. A. Heskell, C. Huntingford, F. Y. Ishida, J. Kattge, H. Lambers, M. J. Liddell, J. Lloyd, C. H. Lusk, R. E. Martin, A. P. Maksimov, T. C. Maximov, Y. Malhi, B. E. Medlyn, P. Meir, L. M. Mercado, N. Mirotchnick, D. Ng, Ü. Niinemets, O. S. O'Sullivan, O. L. Phillips, L. Poorter, P. Poot, I. C. Prentice, N. Salinas, L. M. Rowland, M. G. Ryan, S. Sitch, M. Slot, N. G. Smith, M. H. Turnbull, M. C. VanderWel, F. Valladares, E. J. Veneklaas, L. K. Weerasinghe, C. Wirth, I. J. Wright, K. R. Wythers, J. Xiang, S. Xiang, J. Zaragoza-Castells, Global variability in leaf respiration in relation to climate, plant functional types and leaf traits. *Nouveau Phytol.* **206**, 614-636 (2015).
 22. R. J. Hijmans, S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, A. Jarvis, Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **25**, 1965-1978 (2005).
 23. Y. Pan, R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, D. Hayes, Un puits de carbone important et persistant dans les forêts du monde. *Science* **333**, 988-993 (2011).
 24. R. B. Myneni, J. Dong, C. J. Tucker, R. K. Kaufmann, P. E. Kauppi, J. Liski, L. Zhou, V. Alexeyev, M. K. Hughes, Un grand puits de carbone dans la biomasse ligneuse des forêts du Nord. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **98**, 14784-14789 (2001).
 25. C. R. Schwalm, C. A. Williams, K. Schaefer, D. Baldocchi, T. A. Black, A. H. Goldstein, B. E. Law, W. C. Oechel, R. L. Scott, Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America. *Nat. Geosci.* **5**, 551 (2012).
 26. R. Bertrand, J. Lenoir, C. Piedallu, G. Riofrio-Dillon, P. de Ruffray, C. Vidal, J. C. Pierrat, J. C. Gégout, L'évolution de la composition des communautés végétales est à la traîne par rapport au réchauffement climatique dans les forêts de plaine. *Nature* **479**, 517-520 (2011).
 27. R. T. Corlett, D. A. Westcott, Les mouvements de plantes suivront-ils le changement climatique ? *Tendances Ecol. Evol.* **28**, 482-488 (2013).
 28. K. Zhu, C. W. Woodall, J. S. Clark, Échec de la migration : Manque d'expansion de l'aire de répartition des arbres en réponse au changement climatique. *Glob. Chang. Biol.* **18**, 1042-1052 (2012).
 29. C. K. Ghalambor, J. K. McKay, S. P. Carroll, D. N. Reznick, Adaptive versus non-Duffy *et al.*, *Sci. Adv.* 2021 ; **7** : eaay1052 13 janvier 2021
 - adaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. *Funct. Ecol.* **21**, 394-407 (2007).
 30. R. Weiss, Le dioxyde de carbone dans l'eau et l'eau de mer : La solubilité d'un gaz non idéal. *Mar. Chem.* **2**, 203-215 (1974).
 31. M. Toomey, M. A. Friedl, S. Froking, K. Hufkens, S. Klosterman, O. Sonnentag, D. D. Baldocchi, C. J. Bernacchi, S. C. Biraud, G. Bohrer, E. Brzostek, S. P. Burns, C. Coursolle, D. Y. Hollinger, H. A. Margolis, H. McCaughey, R. K. Monson, J. W. Munger, S. Pallardy, R. P. Phillips, M. S. Torn, S. Wharton, M. Zeri, A. D. Richardson, Greenness indices from digital cameras predict the timing and seasonal dynamics of canopy-scale photosynthesis. *Ecol. Appl.* **25**, 99-115 (2015).
 32. J. Peñuelas, P. Ciais, J. G. Canadell, I. A. Janssens, M. Fernández-Martínez, J. Carnicer, M. Obersteiner, S. Piao, R. Vautard, J. Sardans, Passage d'une période dominée par la fertilisation à une période dominée par le réchauffement. *Nat. Ecol. Evol.* **1**, 1438-1445 (2017).
 33. N. Forsell, O. Turkovska, M. Gusti, M. Obersteiner, M. den Elzen, P. Havlík, Assessing the INDCs' land use, land use change, and forest emission projections. *Gestion du bilan carbone.* **11**, 26 (2016).

34. M. W. van der Kamp, E. J. Prentice, K. L. Kraakman, M. Connolly, A. J. Mulholland, V. L. Arcus, Origines dynamiques des changements de capacité thermique dans les réactions catalysées par des enzymes. *Nat. Commun.* **9**, 1–7 (2018).
35. D. Papale, M. Reichstein, M. Aubinet, E. Canfora, C. Bernhofer, W. Kutsch, B. Longdoz, S. Rambal, R. Valentini, T. Vesala, D. Yakir, Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique : Algorithmes et l'estimation de l'incertitude. *Biogeosciences* **3**, 571-583 (2006).
36. G. Lasslop, M. Reichstein, D. Papale, A. D. Richardson, A. Arneeth, A. Barr, P. Stoy, G. Wohlfahrt, Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach : Problèmes critiques et évaluation globale. *Glob. Chang. Biol.* **16**, 187-208 (2010).
37. C. R. Schwalm, C. A. Williams, K. Schaefer, A. Arneeth, D. Bonal, N. Buchmann, J. Chen, B. E. Law, A. Lindroth, S. Luyssaert, Assimilation exceeds respiration sensitivity to drought : Une synthèse de FLUXNET. *Glob. Change Biol.* **16**, 657-670 (2010).
38. M. Jung, S. Koirala, U. Weber, K. Ichii, F. Gans, G. Camps-Valls, D. Papale, C. Schwalm, G. Tramontana, M. Reichstein, L'ensemble FLUXCOM des flux énergétiques globaux terre-atmosphère. *Données scientifiques*. **6**, 1–14 (2019).
39. C. J. Still, J. A. Berry, G. J. Collatz, R. S. DeFries, Global distribution of C_3 and C_4 vegetation : Implications du cycle du carbone. *Glob. Biogéochimie. Cycles*. **17**, 1006–1014 (2003).
40. G. J. Collatz, J. A. Berry, J. S. Clark, Effects of climate and atmospheric CO_2 partial pressure on the global distribution of C_4 grasses : Présent, passé et futur. *Oecologia* **114**, 441-454 (1998).

Remerciements : Nous tenons à remercier D. Huntzinger pour son soutien à ce concept ; C. Truettner pour le support des données WorldClim ; K. Schmidt, M. Hurteau, et P. Fulé pour le feedback sur le cadrage ; et D. Sonderegger pour le feedback sur l'analyse d'incertitude. Ce travail a utilisé des données de covariance de tourbillon acquises et partagées par la communauté FLUXNET, y compris ces réseaux : AmeriFlux, AfriFlux, AsiaFlux, CarboAfrica, CarboEuropeIP, CarboItaly, CarboMont, ChinaFlux, Fluxnet-Canada, GreenGrass, ICOS, KoFlux, LBA, NECC, OzFlux-TERN, TCOS-Siberia et USCCC. Les données de la réanalyse intermédiaire de l'ERA sont fournies par le CEPMMT et traitées par le LSCE. Le traitement et l'harmonisation des données de covariance de tourbillon de FLUXNET ont été réalisés par le European Fluxes Database Cluster, le projet de gestion AmeriFlux et le projet Fluxdata de

FLUXNET, avec le soutien du CDIAC et du Centre thématique sur les écosystèmes de l'ICOS, et des bureaux OzFlux, ChinaFlux et AsiaFlux. **Financement** : Le financement de cette recherche a été assuré par la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (subvention NNX12AK12G), la National Science Foundation (NSF) East-Asia Pacific Summer Institute Fellowship (1614404), la Royal Society of New Zealand Foreign Partnership Programme (EAP-UOW1601), et le New Zealand Marsden Fund (subvention 16-UOW-027). **Contributions des auteurs** : K.A.D., C.R.S., V.L.A. et L.A.S. ont conçu l'analyse. K.A.D. a effectué l'analyse avec le soutien de L.L.L. K.A.D. a rédigé le manuscrit avec les contributions de tous les auteurs. C.R.S. et G.W.K. ont contribué de manière significative à l'élaboration du document. **Intérêts divergents** : Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts concurrents. **Disponibilité des données et du matériel** : L'accès aux données de FLUXNET dépend du niveau de données utilisé. Les données de niveau 1 sont ouvertes et gratuites à des fins scientifiques et éducatives, et leur utilisation suit la politique d'utilisation équitable accessible à l'adresse <https://fluxnet.fluxdata.org/data/data-policy/>. Les données de niveau 2 proviennent de producteurs qui ne sont actuellement pas en mesure de partager leurs données de manière ouverte et qui ont besoin d'une proposition approuvée pour l'accès aux données. Des informations sur les propositions d'accès aux données sont disponibles à l'adresse suivante : <https://fluxnet.fluxdata.org/>. Une liste des sites FLUXNET des niveaux 1 et 2 se trouve dans les documents complémentaires (tableau S3). Les données climatiques WorldClim CMIP5 à échelle réduite sont disponibles gratuitement sur <http://worldclim.org/CMIP5v1>. Les données FLUXNET à échelle supérieure utilisées pour évaluer la productivité de la biosphère sont disponibles gratuitement sur www.fluxcom.org/. Un dépôt ouvert avec le code utilisé pour adapter le MMRT ainsi que les paramètres dérivés pour chaque site FLUXNET utilisé dans cette analyse sont disponibles à l'adresse <https://github.com/katharynduffy/TmaxLandUptake>. Le T_{max} maillé généré à partir de cette analyse ainsi que les moyennes multimodèles CMIP5 et la productivité de la biosphère maillée, qui est affectée par le T_{max} , sont disponibles gratuitement sur <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.893266>.

Soumis le 20 mai 2019

Accepté le 20 novembre 2020

Publié le 13 janvier 2021

10.1126/sciadv.aay1052

Citation : K. A. Duffy, C. R. Schwalm, V. L. Arcus, G. W. Koch, L. L. Liang, L. A. Schipper, How close are we close to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere ? *Sci. Adv.* **7**, eaay1052 (2021).

Dans quelle mesure sommes-nous proches du point de basculement de la température de la biosphère terrestre ?

Katharyn A. Duffy, Christopher R. Schwalm, Vickery L. Arcus, George W. Koch, Liyin L. Liang et Louis A. Schipper

Sci Adv 7 (3), eaay1052.

DOI :

10.1126/sciadv.aay1052

OUTILS D'ARTICLE

<http://advances.sciencemag.org/content/7/3/eaay1052>

SUPPLÉMENTAIRE MATERIAUX

<http://advances.sciencemag.org/content/suppl/2021/01/11/7.3.eaay1052.DC1>

RÉFÉRENCES

Cet article cite 39 articles, dont 4 sont accessibles gratuitement

<http://advances.sciencemag.org/content/7/3/eaay1052#BIBL>

PERMISSIONS

<http://www.sciencemag.org/help/reprints-and-permissions>

L'utilisation de cet article est soumise aux [conditions d'utilisation](#)

Science Advances (ISSN 2375-2548) est publié par l'American Association for the Advancement of Science, 1200 New York Avenue NW, Washington, DC 20005. Le titre "*Science Advances*" est une marque déposée de l'AAAS.

Copyright © 2021 Les auteurs, certains droits réservés ; licence exclusive American Association for the Advancement of Science. Aucune revendication sur les travaux originaux du gouvernement américain. Distribué sous une licence Creative Commons Attribution NonCommercial License 4.0 (CC BY-NC).