



POINTS DE BASCULEMENT : LES SURPRISES DU CLIMAT

Sofia Palazzo Corner^{1*} and Chris D. Jones^{2†}

¹Centre de Police environnementale, Imperial College London, Londres, Royaume Uni

²Centre Hadley de l'Office métropolitain, Exeter, Royaume Uni

Nous savons que plus il y a de gaz à effet de serre libéré, plus la planète se réchauffe. Mais, à un certain moment, une *petite quantité* de gaz à effet de serre supplémentaire pourrait-elle entraîner un changement climatique *très important* ? Et ce grand changement pourrait-il être irréversible ? Lorsqu'un petit changement provoque un effet très important (et durable), on parle de point de basculement. Les scientifiques tentent de comprendre s'il existe des points de basculement dans le système climatique de la Terre et, si c'est le cas, quel impact pourraient-ils avoir.

QU'EST-CE QU'UN POINT DE BASCULEMENT ?

Lorsqu'un très petit changement provoque un effet important sur le long terme, on parle de **point de basculement**. En langage scientifique, on dit que le système passe d'un "état" à un autre. Pour comprendre cette définition, prenons un exemple de point de basculement dans notre vie quotidienne. Imagine que tu fais du vélo au sommet d'une colline (**Figure 1**). Chaque fois que tu appuies sur les pédales, tu avances un peu plus, jusqu'à ce qu'une pression te rapproche du bord de la colline et que tu te mettes à rouler irréversiblement vers le bas de la colline. La dernière fois que tu as appuyé sur les pédales, tu as franchi le **seuil** qui te fait passer d'un état — être en haut de la colline — à un autre état — être en bas de la colline. Les scientifiques cherchent à comprendre s'il existe des points de basculement dans le système

POINT DE BASCULEMENT.

Seuil d'un système qui, lorsqu'il est franchi, entraîne des changements importants. Le bord d'une colline est un exemple de point de basculement : passer le bord te fait passer de haut en bas.

SEUIL. Valeur qui doit être franchie pour qu'un système passe d'un état à un autre.

climatique de la Terre et, si c'est le cas, quels en seraient les impacts mondiaux dans le futur.

Nous allons maintenant décrire les parties du système climatique de la Terre où un phénomène de seuil semble le plus susceptible de se produire.

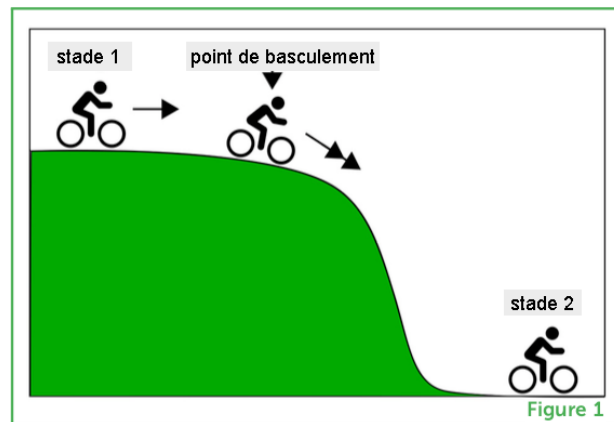


Figure 1. Lorsque tu fais du vélo au sommet d'une colline, la dernière pression sur les pédales te fait dépasser le point de basculement et te fait irrémédiablement descendre jusqu'au bas de la colline.

UN POINT DE BASCULEMENT POUR LES CALOTTES GLACIAIRES

La Terre possède deux grandes calottes glaciaires : celle du Groenland, au nord, et celle de l'Antarctique, au sud. Prenons l'exemple de la calotte glaciaire du Groenland.

La couche de glace du Groenland est un vestige de la dernière période glaciaire, ce qui signifie qu'elle ne s'est pas formée dans le climat actuel, mais à une époque où le climat était beaucoup plus froid. La couche de glace du Groenland est si épaisse qu'elle atteint une altitude de plus de 2 km au-dessus du niveau de la mer. À cette hauteur, l'air est beaucoup plus froid qu'au niveau de la mer, et la glace reste gelée. Par le passé, l'air était suffisamment froid pour empêcher la glace de fondre trop rapidement, et la neige tombant sur la couche de glace remplaçait la glace qui fondait et se perdait dans l'océan. A présent, comme les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère ont piégé davantage de chaleur sur la Terre, l'air s'est réchauffé, faisant fondre la calotte glaciaire plus rapidement qu'elle ne peut être remplacée par la neige qui tombe.

Au fur et à mesure que la glace fond, la calotte glaciaire rétrécit : sa surface et sa hauteur diminuent. Ayant une altitude plus basse, la calotte glaciaire est plus exposée à l'air chaud. Ainsi, plus la glace fond, plus la couche de glace diminue de hauteur, donc plus rapidement elle se réchauffe et plus elle fond vite et ainsi de suite (**Figure 2**) [1].

C'est ce que l'on appelle une **boucle de rétroaction positive** (ou phénomène auto-entretenu) — chaque fois que le phénomène se produit, la situation s'aggrave. À un point critique, les scientifiques pensent que la calotte glaciaire franchira un seuil à partir duquel l'état

BOUCLE DE RÉTROACTION POSITIVE.

Processus qui se renforce au fur et à mesure qu'il se produit. La fonte et le rétrécissement de la calotte glaciaire du Groenland est un exemple d'une boucle de rétroaction positive.

de glace permanente passera irréversiblement à un état sans glace, après avoir passé un point de basculement, la calotte glaciaire disparaîtra inévitablement [2].

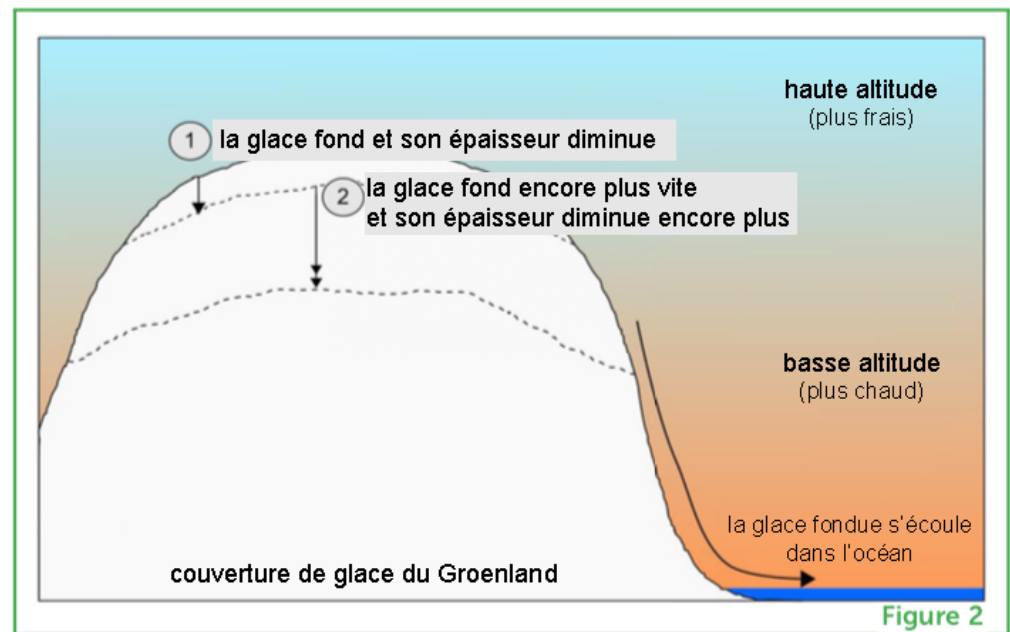


Figure 2. La fonte de la calotte glaciaire du Groenland est un exemple de boucle de rétroaction positive. À mesure que le climat se réchauffe, la calotte glaciaire fond et son épaisseur (1). Comme son altitude est plus basse, l'air est plus chaud et l'épaisseur de la calotte glaciaire diminue encore plus vite (2). Le point de basculement serait le seuil à partir duquel la glace continuera inévitablement à fondre jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement.

UN POINT DE BASCULEMENT POUR LES SURFACES TERRESTRES

La forêt tropicale amazonienne est l'un des plus grands écosystèmes naturels de la planète. Elle absorbe tellement de dioxyde de carbone qu'elle est parfois considérée comme le poumon de la Terre. Sans l'Amazonie, il y aurait beaucoup plus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Une forêt tropicale a besoin de beaucoup de pluie. L'Amazonie est si vaste qu'elle produit jusqu'à la moitié de ses propres précipitations, rien qu'avec l'eau qui s'évapore des plantes et du sol [3]. Sans précipitations suffisantes, la forêt tropicale devient vulnérable à d'autres changements.

Le réchauffement du climat s'accompagne d'une modification du régime des pluies. Les modèles climatiques prévoient une réduction des précipitations sur la forêt amazonienne à mesure que les températures mondiales augmentent. Pour aggraver la situation, la forêt tropicale amazonienne se rétrécit également en raison de la déforestation (les humains coupent les arbres), ce qui réduit la quantité de pluie que la forêt peut produire à partir de sa propre évaporation. S'il n'y a pas assez de pluie et que l'Amazonie s'assèche trop, la forêt tropicale pourrait dépérir, ce qui signifie que les arbres mourraient et ne repousseraient pas. La forêt tropicale serait alors remplacée par des prairies et des savanes (Figure 3) [4, 5].

DÉPÉRISSEMENT DE LA FORÊT AMAZONIENNE.

Perte de biomasse (forêt tropicale) due au changement climatique, notamment à la modification du régime des précipitations et à l'augmentation des incendies de forêt.

PUITS DE CARBONE.

Quelque chose qui absorbe plus de dioxyde de carbone qu'il n'en libère, ce qui soustrait du dioxyde de carbone à l'atmosphère. Les forêts tropicales sont un exemple de puits de carbone.

CIRCULATION MÉRIDIANNE DE RETOURNEMENT ATLANTIQUE (AMOC).

Atlantic Meridional Overturning Circulation) : Système de courants dans l'océan Atlantique, faisant circuler l'eau des tropiques vers l'Atlantique Nord.

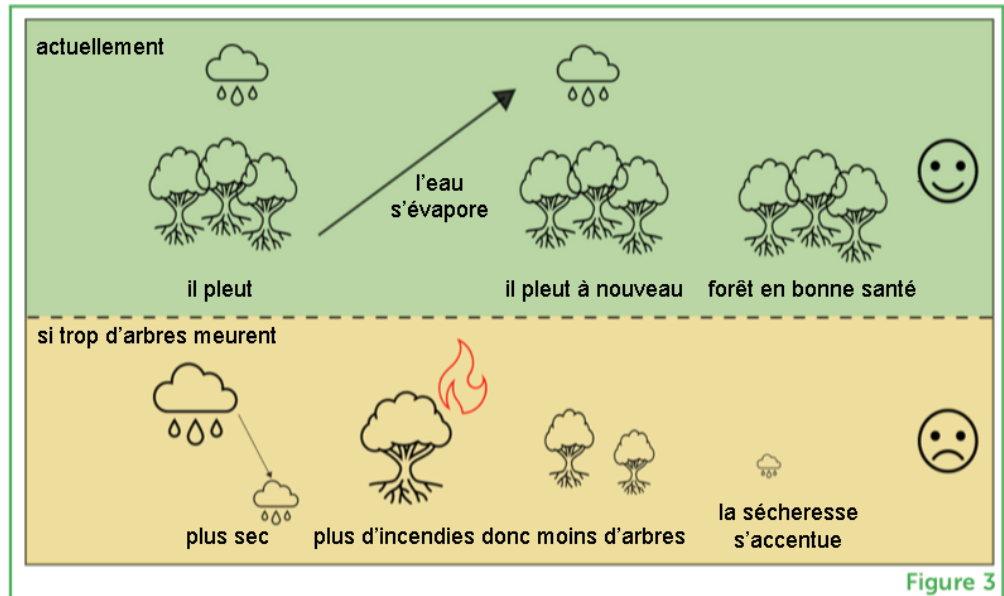


Figure 3

Figure 3. L'évolution du régime des précipitations et la déforestation pourraient constituer un point de basculement pour la forêt tropicale amazonienne. Actuellement, il pleut, l'eau s'évapore et forme des nuages ; ces nuages se transforment en pluie qui tombent sur la forêt ; la forêt est en bonne santé. La réduction du nombre d'arbres dans la forêt amazonienne entraîne une diminution des précipitations et une augmentation des feux. À terme, cela pourrait entraîner le dépérissement de la forêt et les arbres seraient remplacés par des prairies. L'Amazonie étant un important puits de carbone, le dépérissement de la forêt amazonienne pourrait perturber le système climatique de la Terre

Le **dépérissement de la forêt amazonienne** supprimerait un important **puits de carbone** du système climatique de la Terre, ce qui signifierait qu'une plus grande quantité de gaz à effet de serre resterait dans l'atmosphère, réchauffant la Terre de plus en plus rapidement. Le moment où il n'y a plus assez d'arbres en Amazonie, ou pas assez de pluie, est un exemple de point de basculement possible sur la terre.

UN POINT DE BASCULEMENT POUR L'OcéAN

Dans l'océan Atlantique, il existe un vaste ensemble de courants d'eau appelé **Circulation méridienne de retournement atlantique** (AMOC). Ces courants transportent l'eau des tropiques (près de l'équateur) vers le nord, en direction de l'Arctique, où l'eau se refroidit, s'enfonce, puis retourne vers les tropiques (**Figure 4**). Cette circulation s'autoalimente : plus il y a d'eau qui s'enfonce dans le nord, plus il y en a qui remonte au niveau des tropiques pour se diriger à nouveau vers le nord puis s'enfoncer à nouveau. Cependant, avec la fonte de la calotte glaciaire et l'augmentation des pluies au Groenland, le volume d'eau froide et douce devient plus important dans la partie nord de l'océan Atlantique [6]. Cette eau douce se mélange à l'eau salée, la rendant plus légère et moins susceptible de s'enfoncer. Le flux d'eau s'en trouve affaibli, ce qui entraîne un ralentissement de l'AMOC.

Les climatologues et les océanographes essaient de comprendre si ce ralentissement pourrait un jour se transformer en arrêt complet. L'AMOC est à l'origine du climat doux de l'Europe occidentale ; sans

elle, les températures et les précipitations y seraient tout à fait différentes. Ces énormes flux d'eau jouent également un rôle important dans l'absorption de la chaleur et du carbone. Les scientifiques cherchent à déterminer s'il existe un point critique (un seuil) à partir duquel le *ralentissement* de l'AMOC pourrait basculer vers un *arrêt* irréversible de ces courants [1]. Voici un exemple de point de basculement potentiel dans l'océan.

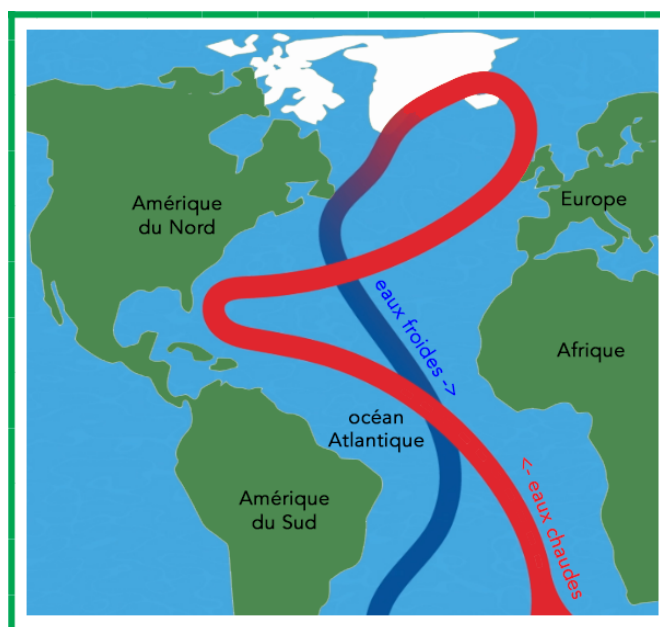


Figure 4*. Représentation schématique de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC).

POURQUOI DEVONS-NOUS NOUS PRÉOCCUPER DES POINTS DE BASCULEMENT ?

S'il existe des points de basculement dans le système climatique de la Terre, l'un d'entre eux pourrait-il déclencher les autres, comme une rangée de dominos ? C'est une possibilité très inquiétante. Les éléments de basculement peuvent provoquer des changements brusques ou lents mais, dans tous les cas, franchir le seuil entraîne une évolution inévitable du système vers un nouvel état. Franchir un point de basculement dans une partie du système climatique de la Terre peut rendre plus probable l'approche d'un seuil dans une autre partie. Cet effet d'un point de basculement en entraînant un autre est appelé **cascade de points de basculement** [7].

La Terre atteindra-t-elle bientôt un point de basculement ? Le système climatique de la Terre est très complexe. Les scientifiques s'appuient sur un grand nombre d'éléments pour comprendre ce qui se passera à l'avenir ; ils construisent des modèles climatiques et observent les changements dans des endroits particuliers, comme l'océan.

À l'heure actuelle, nous savons qu'une augmentation des gaz à effet de serre entraîne un réchauffement plus important, mais nous ne savons pas *exactement quelle quantité* de gaz à effet de serre entraînerait un

* : Figure ajoutée à la version française.

CASCADE DE POINTS DE BASCULEMENT. Lorsque franchir un point de basculement entraîne des changements climatiques qui déclenchent un autre point de basculement, et ainsi de suite.

point de basculement pour les calottes glaciaires ou le dépérissement de la forêt tropicale amazonienne. Cela signifie qu'il y a encore beaucoup d'incertitudes concernant les points de basculement, le moment où ils pourraient se produire et les conséquences qu'ils auraient [8].

Cependant, le simple fait de savoir que des points de basculement *pourraient* être atteints devrait suffire à influencer nos actions aujourd'hui. Les conséquences d'atteindre les points de basculement que nous avons décrits sont si graves que, même si leur probabilité est faible, c'est peut-être un risque que nous ne voulons pas prendre [9]. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles tous les gouvernements du monde s'engagent à tenter de limiter le changement climatique afin de réduire les risques de ces conséquences très graves.

Les scientifiques continueront à travailler pour comprendre s'il existe des points de basculement dans le système terrestre et, dans l'affirmative, à quel moment ils pourraient se déclencher et ce qui pourrait se produire s'ils l'étaient. Plus nous en apprendrons sur les points de basculement, mieux nous pourrions planifier les moyens de les éviter ou, du moins, de les gérer s'ils se produisent. La possibilité de points de basculement et de cascades de points de basculement est une très bonne raison pour que nous prenions dès aujourd'hui de nombreuses mesures positives afin de réduire nos émissions de gaz à effet de serre.

RÉFÉRENCES

- [1] Good, P, Bamber, J., Halladay, K., Harper, A. B., Jackson, L. C., Kay, G., et al. 2018. Recent progress in understanding climate thresholds: Ice sheets, the Atlantic meridional overturning circulation, tropical forests and responses to ocean acidification. *Progr Phys Geogr.* 42:24–60. doi: 10.1177/0309133317751843
- [2] Robinson, A., Calov, R., and Ganopolski, A. 2012. Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nat Clim Change.* 2:429–32. doi: 10.1038/nclimate1449
- [3] van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B., and Steele-Dunne, S. C. 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resource Res.* 46, W09525. doi: 10.1029/2010WR009127
- [4] Lovejoy, T. E., and Nobre, C. 2018. Amazon tipping point. *Sci Adv.* 4:eaat2340. doi: 10.1126/sciadv.aat2340
- [5] Staal, A., Fetzer, I., Wang-Erlandsson, L., Bosmans, J. H. C., Dekker, S. C., van Nes, E. H., et al. 2020. Hysteresis of tropical forests in the 21st century. *Nat Commun.* 11:4978. doi: 10.1038/s41467-020-18728-7
- [6] Lohmann, J., and Ditlevsen, P. D. 2021. Risk of tipping the overturning circulation due to increasing rates of ice melt. *Proc Natl Acad Sci USA.* 118:e2017989118. doi: 10.1073/pnas.2017989118

[7] Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., et al. 2018. Trajectories of the earth system in the anthropocene. *Proc Natl Acad Sci USA*. 115:8252–9. doi: 10.1073/pnas.1810141115

[8] Wang, S., and Hausfather, Z. 2020. ESD reviews: mechanisms, evidence, and impacts of climate tipping elements. *Earth Syst. Dynam. Disc.* 1–93. doi: 10.5194/esd-2020-16

[9] Lenton, T. M., Rockstrom, J., Gaffney, O., Rahmstorf, S., Richardson, K., Steffen, W., et al. 2019. Climate tipping points - too risk to bet against. *Nature*. 575:592–5. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0

VERSION FRANÇAISE

Cet article d'accès libre est une traduction avec modifications d'un article publié par Frontiers for Young Minds (doi : 10.3389/frym.2021.703610 ; Palazzo Corner S and Jones C (2021) Tipping Points: Climate Surprises. *Front. Young Minds*. 9:703610).

TRADUCTION : Nicole Pasteur, Association Jeunes Francophones et la Science

ÉDITION : Catherine Braun-Breton, Association Jeunes Francophones et la Science

MENTORS SCIENTIFIQUES : Ula Hibner et Marie Péquignot

REMERCIEMENTS : Merci à Laurent Laval pour son accueil et son implication dans l'édition de cet article par ses élèves.

JEUNES ÉDITEURS

ÉLÈVES DE TERMINALE, LYCÉE JOFFRE, MONTPELLIER, 17-18 ANS

Nous sommes un groupe de lycéennes et lycéens en spécialité scientifique à Montpellier, dans le sud de la France. Yannis, aime les sciences (et les fourmis). Noémie aime regarder Doctor Who. Maxime adore jouer de la musique. Arthur est sensible à l'écologie. Bazile, Théodore, Ulysse, Maëlys, Sarah, Noé, Jules et Ninon, aiment les cochenilles et lisent fréquemment des articles sur la physique quantique qui les intéressent énormément.

ARTICLE ORIGINAL (VERSION ANGLAISE)

SOU MIS le 30 avril 2021 ; **ACCEPTÉ** le 25 octobre 2021.

PUBLIÉ EN LIGNE le 18 novembre 2021.

ÉDITEUR : Dominik Großkinsky, Austrian Institute of Technology (AIT), Autriche

MENTOR SCIENTIFIQUE : Melissa Mageroy

CITATION : Palazzo Corner S and Jones C (2021) Tipping Points: Climate Surprises. *Front. Young Minds*. 9:703610. doi: 10.3389/frym.2021.703610

DÉCLARATION DE CONFLIT D'INTÉRÊT

Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un conflit d'intérêt potentiel.

DROITS D'AUTEURS

Copyright © 2021 Palazzo Corner and Jones

Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence Creative Commons Attribution (CC BY). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNE EXAMINATEUR

DAVID, 11 ANS

J'aime pêcher et être en plein air. Mon plat préféré est le poisson-chat frit avec une sauce tartare. Ma couleur préférée est le vert métallique profond. Mon film préféré est Harry Potter et le prisonnier d'Azkaban.

AUTEURS

SOFIA PALAZZO CORNER

Sofia Palazzo Corner est doctorante à l'Imperial College de Londres, où elle étudie les processus à faible probabilité et à fort impact du système climatique terrestre, dont certains impliquent des points de basculement. Elle est supervisée par le Dr Chris D. Jones. Sofia est titulaire d'un diplôme de premier cycle en physique et d'une maîtrise en mathématiques appliquées. Elle est une cycliste passionnée et sait tout sur les descentes de collines trop rapides. *s.palazzo-corner19@imperial.ac.uk

CHRIS D. JONES

Chris D. Jones est chercheur en climatologie au Met Office Hadley Centre d'Exeter, au Royaume-Uni. Il a plus de 25 ans d'expérience dans l'écriture de programmes informatiques visant à modéliser la manière dont le climat affecte nos écosystèmes naturels et dont le cycle du carbone contribue à réduire la quantité de pollution par le CO₂ dans l'atmosphère. Il dirige un programme de recherche avec des partenaires au Brésil et a visité des sites de recherche dans la forêt amazonienne. [torcid.org/0000-0002-7141-9285](https://orcid.org/0000-0002-7141-9285)