11

Les climats du passé

L'étude des climats du passé offre une perspective unique pour comprendre la sensibilité et la stabilité du climat de la Terre. Les archives paléoclimatiques nous indiquent que notre planète a enregistré un large éventail de climats sur plusieurs échelles de temps.

PARTENAIRES

Université fédérale Fluminense (UFF), Brésil

Institut de géosciences, université de São Paulo (IG-USP), Brésil

Observatoire national, Rio de Janeiro (ON), Brésil

Université fédérale d'Amazonas (Ufam), Brésil

Centre d'énergie nucléaire pour l'agriculture, université de São Paulo (CENA-USP), Brésil

Université de l'État de Rio de Janeiro (UERJ-Laramg), Brésil

Université fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ), Brésil

Institut de protection radiologique et de dosimétrie, Commission nationale d'énergie nucléaire (CNEN), Brésil

Institut national de recherches spatiales (INPE), Brésil

Institut d'astronomie, de géophysique et de sciences atmosphériques (USP), Brésil

Pourquoi étudier les climats du passé ?

Les compartiments biosphère, atmosphère, océans, cryosphère et systèmes terrestres évoluent au cours des temps géologiques, déterminant les changements dans la composition et l'évolution des organismes vivants sur la planète, y compris l'espèce humaine. Depuis la révolution industrielle, la société humaine a rendu disponibles d'importants stocks de carbone qui étaient stockés dans le compartiment géologique et qui, aujourd'hui, associés aux modifications des cycles biogéochimiques du carbone et de l'azote, favorisent ce que l'on appelle le changement climatique anthropique. Ainsi, il est important d'étudier les climats passés afin de déterminer quelle est la part du changement climatique qui est due aux émissions de gaz à effet de serre et celle qui est due au forçage climatique naturel. Si l'on considère que les compartiments de la biosphère ont une grande importance pour le changement climatique, les systèmes terrestres néotropicaux jouent un rôle de premier plan, en particulier l'Amazonie. Celle-ci tient en effet une place majeure dans le fonctionnement du climat de la Terre. L'eau recyclée par l'évapo-transpiration des forêts influence la distribution spatiale des précipitations en Amazonie. Les forêts tropicales ont donc une influence régulatrice importante sur le climat local et régional en modulant les échanges d'humidité et d'énergie entre la terre et l'atmosphère. La déforestation ainsi que les changements de végétation liés au changement climatique perturbent cet échange en diminuant considérablement la recharge en vapeur d'eau de l'atmosphère, ce qui entraîne une diminution des précipitations.

En outre, la forte insolation, les températures élevées et surtout les fortes précipitations font de la forêt amazonienne l'un des écosystèmes les plus productifs au monde, concentrant une biomasse significative pour le cycle global du carbone. Cependant, ce sont des écosystèmes extrêmement fragiles, sensibles à différents types de perturbation, qui peuvent altérer leur productivité, leur biomasse et, par conséquent, les cycles biogéochimiques associés.

Principaux sites d'étude liés à la compréhension des changements paléoclimatiques et aux processus d'accumulation du carbone dans les plaines d'inondation, Amazonie.

Il est donc crucial d'examiner la variabilité climatique au-delà de la période des données climatiques instrumentales par le biais d'études paléoclimatiques (observation et modélisation) si nous voulons comprendre l'ampleur du changement climatique naturel, la rapidité des changements, les mécanismes à l'échelle régionale et mondiale, et les facteurs de forçage externes ou internes qui les contrôlent. En effet, on considère généralement que les enregistrements instrumentaux ne sont pas assez longs pour donner une image complète de la variabilité du climat et qu'ils ont probablement aussi été influencés par les actions humaines.

Ces études offrent une perspective unique pour comprendre la sensibilité et la stabilité du climat de la Terre. Les archives paléoclimatiques nous indiquent que notre planète a enregistré un large éventail de climats sur plusieurs échelles de temps. Nous savons que nombre de ces changements passés ont été influencés par des facteurs tels que les paramètres orbitaux, la variabilité de l'activité solaire, les volcans, ainsi que l'émission et l'absorption de gaz à effet de serre.

Dans la mesure où les modèles climatiques peuvent raisonnablement simuler les climats chauds ou les climats glaciaires du passé, nous sommes convaincus que les modèles peuvent être utilisés pour étudier le climat futur de la Terre.

PARTENAIRES

Service géologique du Brésil (SGB-CPRM)

Université fédérale de Ceará (UFC), Brésil

Embrapa Solos, Brésil

Université de Göttingen, département de Palynologie et de Dynamique climatique, Allemagne

Centre national de surveillance des désastres naturels (Cemaden), Brésil

Département de Sciences atmosphériques de l'Institut d'astronomie, de géophysique, et de sciences atmosphériques (IAG), Brésil

Comment étudie-t-on les climats du passé ?

Les études multidisciplinaires (géochimie, biologie, physique, mathématiques, hydrologie, climat et météorologie) du climat récent et passé et de leurs impacts sur les écosystèmes continentaux de l'Amazonie, écosystèmes qui jouent un rôle important dans la biogéochimie des principaux gaz à effet de serre, sont depuis longtemps une priorité pour la collaboration scientifique franco-brésilienne. En effet, la coopération a commencé dans les années 1970 avec les universités brésiliennes sur le thème des changements climatiques passés. La coopération, avec un accent particulier mis sur la forêt amazonienne, a débuté en 1982. L'importance des résultats obtenus a encouragé un groupe de chercheurs de l'IRD et de partenaires brésiliens à mettre en place un grand projet sur l'histoire de l'Amazonie dans le passé. Ces études ont évolué vers une meilleure connaissance du climat régional et de ses changements par une approche de comparaison de modèles de données, à l'échelle régionale. Dans cette évolution, les études ont progressivement inclus la participation d'autres institutions travaillant avec des modèles couplés climat-océan dans le passé. Au total, ces projets ont permis de former plus de trente étudiants brésiliens en maîtrise et en doctorat, et ont donné lieu à une production scientifique dense. Le succès de ces projets et le désir exprimé par nos partenaires brésiliens de poursuivre et de développer cette coopération fructueuse ont permis d'intégrer d'autres partenaires sud-américains (au Pérou et en Bolivie), renforçant notre collaboration au sein de divers projets nationaux et internationaux (CNPq, LMI, INCTs, ANR), dans le but de reconstituer l'histoire de l'Amazonie.

Carottage de la *várzea* de Curuaí.

Différentes zones géographiques qui composent le biome amazonien ont été étudiées, en considérant les zones d'extrêmes climatiques et de fortes précipitations, les zones de transition climatique/écologique et les zones d'inondation sous l'influence des rivières d'eaux blanches, noires et claires incorporant les nuances de la grande variabilité de l'écosystème du biome amazonien. Le choix des sites d'étude a toujours été basé sur les caractéristiques écologiques, climatologiques et géomorphologiques en utilisant des systèmes d'information géographique. Les enregistrements paléoclimatologiques (carottes) ont été collectés dans des lacs, des plaines d'inondation et des tourbières en utilisant la méthodologie du forage de sédiments lacustres. Les échantillons stockés dans les chambres froides sont échantillonnés par tranches en fonction des différences de caractéristiques des sédiments et en considérant la meilleure résolution possible. Les âges des différentes variations étudiées sont calculés par la méthode du radiocarbone ou carbone 14. D'autres mesures de paramètres physiques, chimiques et biologiques sont obtenues à partir des échantillons collectés sur les carottes.

En parallèle, des études sur les spéléothèmes ont été entreprises à partir des années 2000 pour reconstituer l'hydroclimatologie. Les spéléothèmes sont des concrétions carbonatées trouvées dans les grottes (par exemple les stalagmites et les stalagtites), qui, grâce à des mesures isotopiques, peuvent être utilisées pour caractériser les précipitations qui ont percolé et donné naissance à la concrétion.

En appui à ces études locales et pour une meilleure interprétation régionale du climat et de l'environnement, des outils mathématiques et une modélisation basée sur une approche de comparaison données/modèles ont été

développés. Afin de comprendre l'importance environnementale de ces proxys paléoclimatiques, des méthodologies d'observation par télédétection et par système d'information géographique (SIG) ont été utilisées.

Les principaux résultats des études sur les lacs et de la modélisation

Études des lacs de Serra do Carajás, en Amazonie orientale

Les événements d'érosion et de changement de niveau des lacs déterminés par les données géochimiques ont indiqué des périodes de dégradation de la végétation, principalement entre 25 000 et 15 000 années cal. AP (avant le présent). Le dernier maximum glaciaire (avec des températures de 5 à 7 degrés inférieures dans les tropiques), entre environ 20 000 et 18 000 années cal. AP, est représenté par une absence de sédimentation indiquant des climats plus secs pendant la période glaciaire du Pléistocène. Entre 8 000-4 000 années cal. AP, les indicateurs de feux de forêt ont confirmé un événement de sécheresse majeur et les perturbations intenses de l'écosystème qui y sont associées, qui ont pu être interconnectées avec les perturbations du cycle du carbone à partir de 7 000 ans cal. AP, déterminées par l'augmentation du CO_2 enregistrée dans les profils de glace en Antarctique.

Les enregistrements sédimentaires du lac Saci, Amazonie du Sud

La combinaison des enregistrements palynologiques et géochimiques a indiqué des changements depuis 35 000 années cal. AP dans ce qui est maintenant une zone de transition forêt/savane. Comme on l'a observé en Amazonie orientale, la forêt tropicale humide a connu des périodes d'expansion et de régression en lien avec un climat plus sec et plus froid entre 35 000 et 18 200 cal. AP, et un changement vers des conditions plus chaudes et plus humides entre 9 200 et 7 500 cal. AP. Entre 7 500 et 5 000 années cal. AP, on a observé par analogie, comme en Amazonie orientale, l'apparition d'une phase sèche qui a affecté la distribution de la forêt tropicale humide. Un retour de conditions plus humides a favorisé une augmentation du niveau des lacs et simultanément de la forêt tropicale après 5 000 années cal. AP.

En Amazonie occidentale, au Morro dos Seis Lagos, aujourd'hui la partie la plus humide de l'Amazonie brésilienne

Dans cet environnement, la physionomie de la forêt n'a pas changé au cours des 60 000 dernières années. Cependant, les données géochimiques issues de l'intégration des enregistrements sédimentaires recueillis lors de différentes expéditions scientifiques au Morro dos Seis Lagos, en particulier à Lagoa da Pata (São Gabriel da Cachoeira, État d'Amazonas), ont indiqué une diminution des précipitations pendant les phases glaciaires et sèches de l'Holocène moyen sans changement profond de la végétation.

Que disent les comparaisons entre données et modèles climatiques couplés climat/océan développés avec l'université de São Paulo ?

Pour la période plus récente de l'Holocène (12 000 ans), 20 séries de données paléoclimatologiques publiées dans 84 articles différents ont été comparées aux simulations des modèles climatiques globaux. Les paléodonnées analysées suggèrent un scénario de déficit hydrique sur la plus grande partie de l'est de l'Amérique du Sud pendant l'Holocène moyen par rapport à l'Holocène tardif, à l'exception du nord-est du Brésil.

Vue de la région supérieure de la colline des Six Lacs, où l'on peut voir l'un des six lacs situés dans les dépressions karstiques de cette formation.

Les résultats obtenus dans le cadre du LMI Paleotraces, à partir de 2008

Les membres de ce LMI se sont concentrés sur des études portant sur les 2 000 dernières années en utilisant diverses archives lacustres au Brésil et au Pérou pour la reconstruction à haute résolution des changements environnementaux en Amazonie. Les reconstitutions de l'histoire climatique de l'Amazonie au cours de cette période indiquent un affaiblissement de la circulation de la mousson sud-américaine au cours de l'anomalie climatique médiévale, qui a été une période de climat exceptionnellement chaud dans les régions de l'Atlantique Nord, et qui a pu correspondre à des événements de brûlis à grande échelle, par opposition au petit âge glaciaire, globalement plus froid.

Environnement de la forêt inondée de l'archipel des Anavilhanas (État d'Amazonas).
Les processus de dépôt dans différents environnements de zones inondées sont évalués et quantifiés.

Que disent les documents sur les charbons dans les sols et les sédiments ?

Les premières observations de grands incendies liés aux changements paléoclimatiques ont été faites à partir de la présence de grandes quantités de charbons dans les profils pédologiques de la région de la Transamazonienne entre 6 000 et 3 000 ans cal. AP. Les charbons recueillis et datés dans les sols, ainsi que dans les enregistrements sédimentaires, indiquent des incendies de forêt qui ont eu un fort impact sur de grandes zones forestières et évidemment sur le cycle global du carbone.

Le couplage de données paléoclimatiques (sédimentologiques et palynologiques) a montré de profonds changements dans la biomasse des systèmes forestiers amazoniens depuis le dernier maximum glaciaire. Les changements dans les taux d'accumulation de charbons ont révélé que les perturbations liées aux changements d'utilisation des terres dépassent de plusieurs ordres de grandeur les changements environnementaux causés par les événements climatiques naturels, en particulier et de façon marquée à la fin de l'Holocène, lorsque la végétation forestière a atteint un pic de biomasse et que la présence humaine était importante.

La variabilité climatique, le biome amazonien et le cycle du carbone

Les études du groupe HyBAm (voir chapitre 1) cherchent à utiliser les informations actuelles (hydrologiques, climatologiques, géochimiques et géomorphologiques) pour étudier les faits passés dans une fenêtre temporelle qui comprend principalement l'Holocène. Ces informations sont associées aux données paléoclimatiques générées à partir de carottes sédimentaires. Pendant la phase sèche de l'Holocène moyen, les lacs de la plaine d'inondation ont été isolés du chenal principal de la rivière, ce qui a entraîné une accumulation accrue de carbone. Au contraire, pendant la phase humide de l'Holocène supérieur, l'accumulation de carbone dans ces systèmes de dépôt a été réduite en raison de l'apport intense de matériaux transportés par la rivière, qui a dilué l'accumulation de carbone.

Quelles sont les perspectives ?

Le travail développé au fil des années a permis de comprendre la variabilité du climat et ses impacts sur les systèmes forestiers amazoniens. La dimension humaine a été couplée à des études sur les enregistrements récents dans des zones de changement intense de l'utilisation des sols, démontrant l'impact profond de l'action humaine par rapport aux événements naturels.

Aujourd'hui, ces perspectives soulèvent des questions clés pour l'avenir concernant le rôle des forêts sur le climat telles que : que devons-nous apprendre des sécheresses de l'Holocène par rapport au réchauffement climatique actuel ? Quels sont les forçages naturels et anthropiques à venir qui peuvent déterminer des changements profonds dans les écosystèmes, et comment gérer les systèmes forestiers pour maintenir des services écosystémiques inestimables pour la planète tels que la capture du carbone, le maintien de l'humidité atmosphérique et le transfert de chaleur ?

Pour en savoir plus

ANHUF D. *et al.*, 2006 – Paleo-Environmental Change in Amazonian and Africa Rainforest during the LGM, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 239 : 510-527. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.01.017

CAMPELLO R.-C *et al.*, 2014 – Palaeofires in Amazon: Interplay between land use change and palaeoclimatic events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415 : 137-151.https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.07.020

FONTES D. *et al.*, 2017 – Paleoenvironmental dynamics in South Amazonia, Brazil, during the last 35,000 years inferred from pollen and geochemical records of Lago do Saci. *Quaternary Sciences Review*, 173 : 161-180. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.08.021

MARTINS G. S. *et al.*, 2022 – Late quaternary hydrological changes in the southeastern amazon basin from n-Alkane molecular and isotopic records in sediments of Saci lake, Para State (Brazil). *Global and Planetary Change*, 213 (103833). https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103833

SIFEDDINE A. *et al.*, 2001 – Variations of Amazonian Rain Forest environments: a sedimetological records covering 30, 000 years BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168 : 221-235.https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00256-X

TURCQ B. *et al.*, 2002 – Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology*, 148, 319-342.https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00224-X

Ont participé aux recherches

Renato Campello Cordeiro (UFF), Abdel Sifeddine (IRD), Bruno Jean Turcq (IRD), Michel Servant (IRD), Louis Martin (IRD), François Soubies (IRD), Jean-Marie Flexor (COGE), Kenitiro Suguio (IG-USP), Jorge João Abrão (UFF), Patrícia Florio Moreira Turcq (IRD), Luciane Silva Moreira (UFF), Naziano Filizola (Ufam), Pascal Fraizy† (IRD), André Martinelli (IRD), Keila Cristina Pereira Aniceto (doctorante), Isabel Quintana Cobo (doctorante), Renata Lima da Costa (UFF), Heitor Evangelista (UERJ-Laramg), Ricardo Erthal Santelli (UFF/UFRJ), Francisco Fernando Lamego Simões Filho (UFC), Sambasiva Rao Pachinelam (UFF), Bastiaan Adriaan Knoppers (UFF), Luiz Drude de Lacerda (UFF), Marcelo Correa Bernardes (UFF), Arlei Oliveira da Silva (UFF), Renato de Aragão Rodrigues (UFF), Alice Bosco (UFF), Santos Gabriel Souza Martins (UFF), Juliana Nogueira (UFF), Libério Junio da Silva (UFF) , Marcela Cardoso Guilles da Conceição (UFF), Yvaga Poty Penido (UFF), Daiana Fontes (UFF), Caroline dos Santos Rocha Maia (UFF), Josias Azeredo Barbosa (Inpi), Luiz Carlos Ruiz Pessenda (CENA-USP), Marie-Pierre Ledru (IRD), Hermann Behling (university de Göttingen), Francisco William da Cruz Jr. (IG-USP), José Antônio Marengo (Cemaden), Nicolás Misaidilis Strikis (UFF), Pedro Leite da Silva Dias (IAG).

Liste des auteurs

PARTIE 1 Suivre les dynamiques, comprendre les processus

1 L'observatoire HyBAm sur les grandes rivières amazoniennes

William Santini, ingénieur hydrologue, UMR GET

Naziano Filizola, géologue, université fédérale d'Amazonas, Brésil

Jean-Michel Martinez, hydrologue, UMR GET

Jean-Loup Guyot, hydrologue, retraité

2 Mesurer la diversité forestière

Raphael Pélissier, écologue, UMR Amap

Eduardo Falconi, biologiste, IRD représentation

Frédérique Seyler, pédologue, télédétection, UMR Espace-DEV

3 Le suivi de la déforestation et de la dégradation forestière

Laurent Polidori, télédétection, géodésie, université fédérale du Pará, UMR Cesbio, Brésil

Claudio Almeida, télédétection, Institut national de recherches spatiales du Brésil

4 Les sols : de la dynamique des latérites à la dégradation des terres et de la biodiversité

Thierry Desjardins, pédologue, UMR IEES

Paulo Martins, agronome, université fédérale du Pará, Brésil

Frédérique Seyler, pédologue, télédétection, UMR Espace-DEV

5 Le rôle majeur des plaines d'inondation sur la fonctionnement de l'hydrosystème amazonien

Patrick Seyler, géochimiste, UMR HSM, émérite

Geraldo Boaventura, géochimiste, université de Brasilia, Brésil

6 L'ichtyologie amazonienne

Marc Pouilly, ichtyologue, UMR Borea

Carlos Freitas, université fédérale d'Amazonas, Brésil

7 Ressources en eau et données spatiales

Rodrigo Paiva, hydrologue grande échelle, université fédérale de Rio Grande do Sul, Brésil

Fabrice Papa, hydrologue, climatologue, UMR Legos

PARTIE 2 **Les interactions global-local**

8 Le système estuarien de l'Amazone

Fabien Durand, océanographe, UMR Legos

Alice César Fassoni Andrade, hydrologue, post-doctorante

Patrick Seyler, géochimiste, UMR HSM, émérite

Daniel Moreira, ingénieur cartographe, hydrologie, géodésie, Service géologique du Brésil

Pieter van Beek, géochimiste, UMR Legos

9 Le système côtier amazonien

Jean-François Faure, géographe, UME Espace-DEV

Maria Teresa Prost, géomorphologue, musée Paraense Emílio Goeldi, Brésil

10 Les processus physiques à l'embouchure de l'Amazone

Ariane Koch Larouy, océanographe, UMR Legos

Flavia Lucena Fredou, écologue, université fédérale rurale du Pernambouc, Brésil

Moacyr Araujo, océanographe, climatologue, université fédérale du Pernambouc, Brésil

Arnaud Bertrand, écologue, UMR Marbec

11 Les climats du passé

Renato Campelo Cordeiro, géochimiste, université fédérale Fluminense, Brésil

Abdel Sifeddine, climatologue, UMR Locean

12 Les climats actuels

Josyane Ronchail, géographe, retraitée
Jhan Carlo Espinoza, agronome, UMR IGE

PARTIE 3 **Populations autochtones, populations locales et écosystème**

13 Un observatoire socio-environnemental en Amazonie, l'INCT Odisseia

Marie-Paule Bonnet, hydrologue modélisatrice, UMR Espace-DEV

14 Reconfiguration des modes de vie et dynamiques territoriales

Stéphanie Nasuti, anthropologue, Centre de développement durable, université de Brasilia, Brésil

15 Plantes cultivées : produire et conserver de la diversité

Mauro Almeida, socio-anthropologue, université de Campinas, Brésil, retraitée
Laure Emperaire, ethnobotaniste, retraitée

16 Système alimentaire

Esther Katz, nutritionniste, UMR Paloc
Lucia Van Velthem, anthropologue, ministère de la Science, de la Technologie et de l'Innovation du Brésil (MCTI), musée Paraense Emílio Goeldi/sous-secrétariat de Coordination des unités de recherche (MPEG/SCUP), Brésil

17 Biodiversité spontanée dans les agrosystèmes : plantes sauvages utiles et plantes envahissantes

Izildinha Miranda, écologue, université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra), Brésil
Danielle Mitja, botaniste, UMR Espace-DEV

18 Déforestation, orpaillage et mercure

Jérémie Garnier, géochimiste, département de Géosciences, université de Brasilia (IG-UnB), Brésil

Patrick Seyler, géochimiste, UMR HSM, émérite

19 Environnement et santé en Amazonie, une approche One Health

Emmanuel Roux, mathématicien, UMR Espace-DEV

Helen Gurgel, géographe, laboratoire de Géographie, Environnement et Santé, université de Brasilia (Lagas, UnB), Brésil

TRAJECTOIRES DE RECHERCHES
EN AMAZONIE BRÉSILIENNE

L'IRD
et ses partenaires

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2022

Coordination éditoriale
Corinne Lavagne

Préparation éditoriale
Marie-Laure Portal

Conception maquette
Charlotte Devanz

Mise en page
Aline Lugand – Gris Souris

Sauf mention particulière, toutes les photos de cet ouvrage sont issues de IRD Multimédia.

Photo de couverture
Pupunha, fruit du palmier *Bactris gasipaes*, Amazonie brésilienne.
© IRD/Laure Emperaire

Cette publication en libre accès est mise à la disposition du public selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0, consultable à l'adresse suivante : https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr. Elle autorise toute diffusion de l'œuvre originale (partager, copier, reproduire, distribuer, communiquer), sous réserve de mentionner les auteurs et les éditeurs et d'intégrer un lien vers la licence CC By-NC-ND 4.0. Aucune modification n'est autorisée et l'œuvre doit être diffusée dans son intégralité. Aucune exploitation commerciale n'est autorisée.

© IRD, 2022
ISBN papier : 978-2-7099-2962-2
ISBN PDF : 978-2-7099-2963-9
ISBN epub : 978-2-7099-2964-6

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Frédérique Seyler
Marie-Pierre Ledru
Laure Emperaire

Assistant à l'édition scientifique
Eduardo Falconi