

12

Les climats actuels

Pour le futur, les modèles prédictifs
montrent que le changement climatique global
lié aux émissions de gaz à effet de serre
aura pour conséquences une élévation des températures
dans tout le bassin amazonien
et une baisse supplémentaire des pluies
dans les régions déjà affectées par ce phénomène.
La forêt amazonienne deviendra alors une source de carbone
– elle l'est déjà selon certains auteurs –
et cela intensifiera le changement climatique.

Contexte

Depuis les années 1980, les hydrologues des pays amazoniens et de l'IRD se sont intéressés au climat de l'Amazonie. Il s'agissait au début de réaliser des bilans hydrologiques par bassin versant et de comprendre la variabilité des pluies dans l'espace et dans le temps et, par voie de conséquence, la variabilité du débit des rivières et des transports de sédiments depuis les Andes vers l'Amazonie et l'océan Atlantique. Une des questions initiales portait notamment sur le rôle du phénomène El Niño sur les pluies de la région. En effet, de puissants événements El Niño s'étaient produits successivement en 1972-1973, 1982-1983, 1997-1998, avec des effets dévastateurs, en particulier sur les sociétés rurales des pays d'Amérique du Sud tropicale. Il s'agissait aussi de définir le pouvoir prédictif d'El Niño sur les extrêmes pluviométriques et hydrologiques régionaux. Depuis, ces questions ont évolué. En plus de la variabilité des pluies d'une année sur l'autre, des tendances sont apparues, qu'il convenait d'expliquer; et le sujet des interactions entre surface continentale et climat est devenu de plus en plus prégnant au fur et à mesure du déploiement de la déforestation en Amazonie.

Le projet HyBAm a regroupé les Services nationaux d'hydrologie et de climatologie, ainsi que des chercheurs et des étudiants des sept pays amazoniens (voir chapitre 1) autour des hydrologues et des climatologues de l'IRD. Cela a facilité l'accès à des données très riches et souvent inexplorées. Grâce à ce partenariat avec les institutions et les universités, des recherches innovantes ont pu être menées à une échelle d'analyse régionale relativement fine, notamment sur les bassins versants situés en amont du bassin amazonien, dans les pays andins. Ces nouvelles données ont précisé les travaux



Inondations en Amazonie péruvienne.

réalisés jusqu'alors essentiellement par des chercheurs d'Amérique du Nord ou du sud de l'Amérique latine. Ces recherches se poursuivent aujourd'hui grâce au dynamisme des doctorants sud-américains de l'IRD, devenus professionnels et formateurs de chercheurs à leur tour.

Comment se font les recherches ?

Tout d'abord, des banques de données ont été formées à partir du recueil des mesures faites auprès de centaines de stations météorologiques présentes dans le bassin amazonien, puis complétées par les bases de données climatiques globales issues des informations satellitaires, parfois fusionnées avec des données au sol. Cela a permis une amélioration de la définition spatiale et temporelle des données. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), dans sa version 3B42, fournit des informations toutes les trois heures pour des pixels de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de latitude-longitude. La base de données Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (Chirps), issue de données satellitaires et de données mesurées au sol, fournit une estimation des pluies avec une résolution de $0,05^\circ$ depuis plus de 35 ans entre 50° N et 50° S. Ces banques de données ont ensuite permis de procéder à des analyses statistiques afin de mettre en évidence les tendances régionales.

PARTENAIRES

Agence nationale de l'eau du Brésil (ANA)

Université fédérale d'Amazonas (Ufam), Brésil

Institut de recherches spatiales (INPE), Brésil

Service national de météorologie et d'hydrologie du Pérou (Senamhi)

Institut national de météorologie et d'hydrologie d'Équateur (Inamhi)

Université Mayor de San Andres (UMSA), Bolivie

Institut d'hydrologie, météorologie et études environnementales (Ideam), Colombie

Institut de géophysique du Pérou (IGP)

Sorbonne Université, France

Université d'Antiochia, Colombie

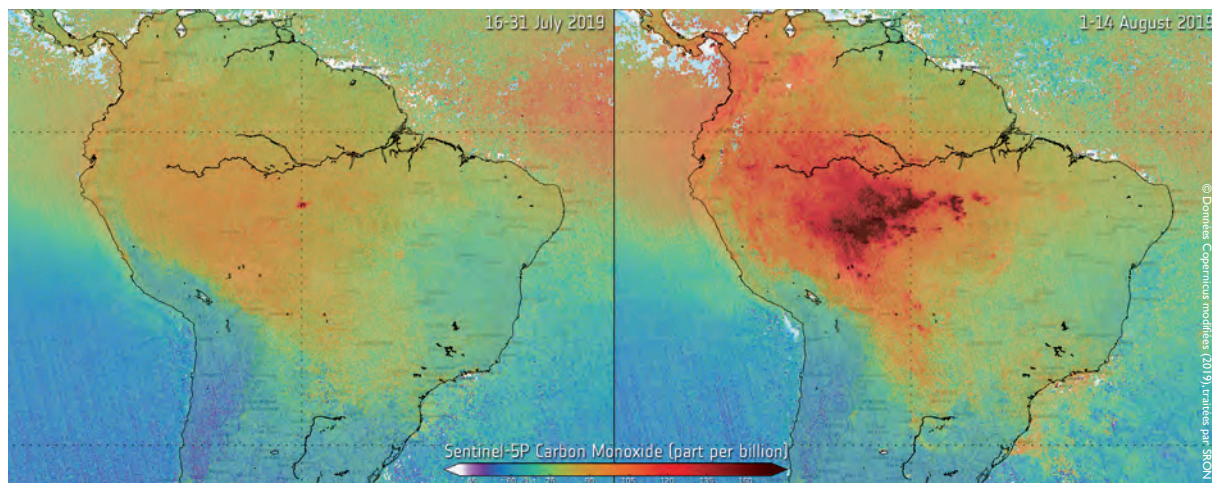
Pour comprendre les variations spatiales et temporelles des pluies, des réanalyses issues des modèles météorologiques fournissent des informations détaillées sur l'état de l'atmosphère (pression, vent, etc.) à différents niveaux altitudinaux. Ensuite, d'autres enregistrements, qui renseignent plus spécifiquement sur les températures de surface océaniques sont également utilisés. Enfin, les modèles climatiques régionaux sont utilisés pour tester des hypothèses concernant par exemple les liens entre pluie et déforestation.

Quels sont les principaux résultats ?

Les principales avancées se situent dans le domaine de la distribution spatiale des pluies, de leur distribution saisonnière, de leur variabilité interannuelle et à long terme, ainsi que sur les causes de ces variabilités, qu'elles soient dues à des modifications dans les océans, dans l'atmosphère ou bien liées à l'activité humaine (par exemple, la déforestation).

Les pluies du bassin de l'Amazonie sont très abondantes, avec en moyenne 2 200 mm/an, mais aussi très variables dans l'espace. L'accès à des données pluviométriques sur l'ensemble des différents pays amazoniens a permis de compléter la connaissance de cette variabilité, notamment dans les régions andines de l'amont. Près de l'Équateur, les pluies sont très fortes, avec plus de 3 000 mm par an, surtout dans le nord-ouest du bassin, vers la triple frontière Colombie-Pérou-Brésil, et dans le nord-est du bassin, vers l'embouchure du fleuve. Elles le sont également le long des Andes, là où les flux humides provenant de l'Atlantique, rechargés en vapeur d'eau par leur passage au-dessus de la forêt qui évapore et transpire, sont soulevés le long des versants très raides des Andes orientales exposés aux vents humides, et des pluies qui dépassent parfois 6 000 mm/an sont enregistrées. Ce phénomène se nomme le « recyclage ». Quand il pleut sur la forêt amazonienne, 75 % de l'eau environ retourne vers l'atmosphère sous forme de vapeur par le biais de l'évaporation et de la transpiration des arbres et du sol. Environ un tiers des pluies provient du recyclage de la vapeur d'eau. Par contre, les pluies s'amenuisent jusqu'à 1 500 mm/an vers les régions tropicales de la périphérie (Roraima au nord, Mato Grosso, Rondônia au Brésil, plaine de Bolivie au sud) et deviennent encore plus faibles dans les Andes en position « sous le vent » ou à forte altitude.

Dans le bassin de l'Amazonie, les pluies varient d'une année sur l'autre. Cette variabilité interannuelle est liée soit à des changements dans la quantité de vapeur d'eau disponible pour la pluie, soit à des modifications de la dynamique de l'atmosphère, elles-mêmes dépendant souvent du comportement thermique des océans voisins de l'Amérique tropicale. Il a été démontré que les pluies de l'est et du nord du bassin sont particulièrement dépendantes des températures de surface des océans Pacifique équatorial et Atlantique tropical. Quand le Pacifique équatorial est chaud (événement El Niño) et/ou quand le gradient de température sur l'Atlantique tropical est positif (nord chaud/sud froid), les pluies sont faibles et la saison pluvieuse est courte. En effet, dans cette configuration, la pression de l'atmosphère augmente et l'apport de vapeur d'eau par les alizés est réduit, formant des conditions défavorables aux pluies en Amazonie. Ces événements océaniques peuvent occasionner de fortes sécheresses, comme en 1995, 1997-1998, en 2005, 2010, 2015.



À partir de données Sentinel-5P du programme Copernicus, l'image montre l'impact des feux en Amazonie, à partir de l'accroissement en monoxyde de carbone dans l'air entre juillet et août 2019.

Lorsque les conditions océaniques sont inversées, notamment lors de l'événement froid dit La Niña, sur l'océan Pacifique, les fortes pluies engendrent des crues considérables, comme en 1986, 1993, 1999, et 2012, 2014, 2017, 2021.

Cependant, la variabilité des pluies ne dépend pas seulement des événements thermiques enregistrés dans les océans voisins, ce qui signifie que le pouvoir prédictif des températures de surface de l'océan sur les pluies n'est pas parfait. Cela se vérifie plus encore pour l'ouest et le sud de l'Amazonie, où les pluies dépendent plus étroitement des conditions thermiques et hygrométriques des surfaces continentales ou des perturbations atmosphériques qui proviennent des hautes latitudes de l'hémisphère Sud.

Sur le long terme, les pluies évoluent dans le bassin de l'Amazonie. Dans le sud du bassin, région tropicale caractérisée par des saisons sèches et humides très marquées, le début de la saison des pluies, qui se produisait habituellement en septembre-octobre, a reculé dans l'année. En Amazonie bolivienne, les pluies ont diminué de 18 % depuis le début des années 1980. Les feux sont devenus plus fréquents, et la saison sèche hivernale s'est également allongée.

Au contraire, dans le nord de l'Amazonie, la fréquence des jours très pluvieux (> 10 mm) s'est accrue, surtout entre mars et mai, et l'on observe une augmentation de 17 % des précipitations, notamment à partir de 1998.

Cette opposition des variations entre le nord et le sud du bassin est liée au réchauffement de l'Atlantique tropical nord depuis les années 1990. Cette chaleur supplémentaire accroît l'ascendance de l'air (et la hausse des pluies) dans le nord du bassin, près des eaux chaudes, et en retour augmente la pression de l'air (et la baisse des pluies) dans le sud du bassin.

Ces changements sur le long terme des pluies ont des conséquences sur les forêts, dont la vie est très dépendante du climat. Dans la partie méridionale du bassin, la moitié des pluies annuelles tombe pendant la saison des pluies, ce qui permet la recharge des nappes d'eau souterraines et la transpiration

des arbres pendant la saison sèche. Mais lorsque la saison sèche s'allonge et que les événements secs deviennent plus fréquents, plus intenses et concernent la moitié de l'Amazonie, comme en 2010, le manque d'eau peut limiter la vie des arbres, voire causer leur mort. Ces limitations par l'eau ou par l'énergie sont plus marquées dans les régions de forêt sèche (*cerrado*) que dans les régions de forêt dense.

La forêt est également mise en péril par la déforestation d'origine anthropique, qui atteint près de 17 %, notamment dans le sud et l'est du bassin, et par les feux souvent déclenchés par l'homme, peu contrôlés, et favorisés par des conditions climatiques sèches. Il s'agit alors de la « savanisation » de la forêt amazonienne dans les régions les plus atteintes à la fois par la baisse des pluies et l'allongement de la saison sèche, par les feux, par la déforestation, avec peut-être un point de non-retour durant le XXI^e siècle.

Or, la forêt est source de vapeur d'eau grâce à l'évapotranspiration des arbres. Le recyclage est à l'origine d'un tiers environ des pluies dans les régions éloignées de l'Atlantique, à l'ouest et au sud du bassin, et il est également fondamental pour les régions adjacentes très peuplées, l'Altiplano andin, le sud-est



Déforestation dans le Pará.

du Brésil, avec ses grandes villes comme São Paulo, où c'est en grande partie la vapeur d'eau d'origine amazonienne qui fournit les pluies. Les travaux en cours utilisent la modélisation afin de mieux comprendre le rôle de la déforestation sur le cycle de l'eau, sur le bilan énergétique en surface et dans l'atmosphère, et donc sur la circulation atmosphérique à échelle régionale et locale et sur les mécanismes qui déclenchent les pluies. Les modèles climatiques montrent notamment que la déforestation est défavorable aux pluies sur le sud du bassin, et que ce phénomène amplifie les effets du réchauffement de l'Atlantique tropical Nord (voir ci-dessus). En résumé, la déforestation accroît la sécheresse, qui elle-même est propice à la disparition de la forêt. On parle alors d'une boucle de rétroaction positive, les effets (perte de forêt par assèchement ou déforestation) d'une cause (émission de carbone par les activités humaines) ayant pour conséquence l'amplification de la cause (déficit de stockage de carbone par la forêt).

Quels sont les enjeux et les perspectives de ces recherches ?

De jeunes scientifiques sud-américains, anciens doctorants à l'IRD, formés en France dans les années 2000 dans le cadre d'HyBAm, contribuent très activement au développement des connaissances climatologiques en Amérique du Sud. Recrutés dans leur domaine d'expertise dans leurs pays d'origine, ils forment aujourd'hui la prochaine génération de climatologues. Leurs travaux sont réalisés en collaboration avec les chercheurs des autres pays amazoniens et internationaux. Ces collaborations au fil du temps, qu'elles soient institutionnelles ou non, sont devenues indispensables pour répondre aux multiples questions nécessitant des outils toujours plus sophistiqués, et pour pallier le nombre relativement faible de chercheurs travaillant dans cette région.

L'Amazonie est assez vaste pour avoir une influence considérable sur son propre climat, mais aussi sur le climat régional sud-américain et sur le climat global.

En effet, nous avons vu qu'une partie de l'Amazonie s'assèche et que cet assèchement néfaste à la forêt est aggravé par la déforestation et les feux. Or, une forêt en mauvais état, dégradée, n'est plus capable de stocker du carbone comme une forêt saine. Ainsi, la forêt amazonienne pourrait devenir une source de carbone pour l'atmosphère au lieu de le stocker dans ses arbres et dans ses sols. Elle viendrait alors augmenter le changement climatique global. Au moment où la végétation et les sols sont considérés comme des solutions majeures pour absorber plus activement le carbone émis par les activités humaines, il est essentiel d'avoir une idée précise de l'évolution du climat et des liens entre climat, forêt et sols en Amazonie.

Ainsi, les banques de données élaborées au cours des dernières décennies par les chercheurs de l'IRD et leurs partenaires sont aujourd'hui devenues précieuses pour le suivi de l'évolution du climat en Amazonie. La poursuite de ces mesures permettra de valider ou corriger les prédictions des modèles et des satellites. Il est indispensable d'approfondir l'étude des mécanismes qui régissent le climat, sa variabilité d'une année sur l'autre et sa tendance sur le long terme, afin de mieux les représenter dans les modèles et mieux prédire le climat futur de l'Amazonie, des régions voisines et du globe. En effet, les modèles climatiques ne sont pas encore très fiables pour



Arrivée de l'orage, Rio Negro, Brésil.

représenter le climat de l'Amazonie, en partie du fait des Andes, qui produisent une très forte rupture dans l'écoulement de l'air. La connaissance détaillée du climat et les simulations du climat futur ont donc encore une large marge d'amélioration.

Les populations amazoniennes, extraordinairement diversifiées, sont étroitement dépendantes du climat et de son évolution, à la fois au niveau des températures et des pluies, dont peut dépendre la survie de nombre d'entre elles.

Les intérêts économiques sont également importants. Les pays amazoniens sont de gros fournisseurs de produits végétaux vendus sur le marché mondial, comme le soja destiné à nourrir les animaux d'élevage. La question se pose de savoir si ces pays pourront poursuivre cette activité, si le climat s'assèche et si la déforestation des terres pour la mise en culture accentue la diminution des pluies nécessaires à l'agriculture.

L'amélioration de la connaissance et de la simulation du climat permettra de réaliser des études d'impacts du changement climatique sur le comportement et la santé des vivants et sur l'économie, pour anticiper et éviter, s'il en est encore temps, des extinctions et de mauvais choix économiques, par des mesures d'atténuation des émissions et des mesures d'adaptation idoines. Il est urgent que les climatologues associent leurs efforts et leurs modèles avec ceux de chercheurs d'autres disciplines, hydrologues, ethnologues, biologistes, agronomes, etc. Le chemin est entamé, mais il doit être poursuivi.

Pour en savoir plus

ESPINOZA J. C. *et al.*, 2018 – Contrasting North-South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981-2017). *Climate Dynamics*. doi: 10.1007/s00382-018-4462-2

ESPINOZA VILLAR J. C. *et al.*, 2009 – Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29 : 1574-1594. 10.1002/joc.1791.

ESPINOZA J. C. *et al.*, 2022 – The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: Atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100406>.

GUTIERREZ-CORI O. *et al.*, 2021 – On the hydroclimate-vegetation relationship in the southwestern Amazon during the 2000-2019 period. *Frontiers in Water*, 3 : 18.

SIERRA J. P. *et al.*, 2021 – Deforestation Impacts on Amazon-Andes Hydroclimatic Connectivity. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007>

Ont participé aux recherches

Josyane Ronchail (université Paris 7-Denis Diderot), Jhan Carlo Espinoza (IRD), Gérard Cochonneau (IRD), Jean-Loup Guyot (IRD), Michel Molinier (IRD), Valdemar Guimarães (ANA), Eurides de Oliveira (ANA), Naziano Filizola (Ufam), Juan-Julio Ordenez (Senamhi, Pérou), Luis Noriega (Senamhi, Pérou), Jorge Molina-Carpio (UMSA), Rodrigo Pombosa (Senamhi, Pérou), Henry Romero (Inamhi, Équateur), Clémentine Junquas (université Grenoble-Alpes), Philippe Vauchel (IRD), Waldo Lavado (Senamhi, Pérou), Guillaume Drapeau (IRD), Steven Chavez (doctorant), Ken Takahashi (IGP), José Marengo (INPE), Hans Segura (Institut de météorologie Max Planck), Omar Gutierrez-Cori (Sorbonne Université), Laurent Li (Sorbonne Université), Sly Wongchuig-Correa, (université Grenoble-Alpes), Juan Pedro Sierra (université Grenoble-Alpes), Paola Andrea Arias (Groupe d'ingénierie et de gestion environnementale [Giga], université d'Antioquia, Medellin, Colombie), Laura Paccini (université de Virginie, États-Unis).

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 Brasília, 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 Brasília,
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 Brasília (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 Brasília (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 Empereire



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