



TRAJECTOIRES DE RECHERCHES EN AMAZONIE BRÉSILIENNE

L'IRD _____
et ses partenaires

**TRAJECTOIRES
DE RECHERCHES
EN AMAZONIE BRÉSILIENNE**

L'IRD et ses partenaires

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 Empeaire



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 Empeaire

Assistant à l'édition scientifique
Eduardo Falconi

SOMMAIRE

9	Préfaces
19	Introduction

PARTIE 1 24 **Suivre les dynamiques, comprendre les processus**

28	1 L'observatoire HyBAm sur les grandes rivières amazoniennes
34	2 Mesurer la diversité forestière
40	3 Le suivi de la déforestation et de la dégradation forestière
48	4 Les sols : de la dynamique des latérites à la dégradation des terres et de la biodiversité
56	5 Le rôle majeur des plaines d'inondation sur le fonctionnement de l'hydrosystème amazonien
62	6 L'ichtyologie amazonienne
68	7 Ressources en eau et données spatiales

PARTIE 2 76 **Les interactions global-local**

80	8 Le système estuarien de l'Amazone
86	9 Le système côtier amazonien
94	10 Les processus physiques à l'embouchure de l'Amazone
98	11 Les climats du passé
104	12 Les climats actuels

PARTIE 3

112

**Populations autochtones, populations locales
et écosystème**

116

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

124

14 Reconfigurations des modes de vie
et dynamiques territoriales

132

15 Plantes cultivées : produire et conserver de la diversité

142

16 Système alimentaire

148

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

156

18 Déforestation, orpaillage et mercure

162

19 Environnement et santé en Amazonie,
une approche One Health

171

Liste des auteurs

Préface

Une énigme à déchiffrer : le rôle de la science en Amazonie

MARCEL BURSZTYN
Socio-économiste,
professeur titulaire au Centre de développement durable
de l'université de Brasilia

Thème récurrent dans les débats sur l'environnement, le changement climatique et la durabilité, l'Amazonie est formée d'un biome complexe et d'un système tout aussi riche et extrêmement diversifié de relations entre les humains et l'environnement naturel. Son immensité (territoriale, culturelle, et qui marque aussi sa biodiversité, ses eaux, ses minéraux...) suscite l'intérêt et excite l'imagination depuis l'arrivée des colonisateurs européens il y a cinq siècles. Mais on sait encore très peu de choses sur la plus grande forêt tropicale de la planète Terre.

Depuis les récits des visiteurs pionniers tels qu'Alexandre Rodrigues Ferreira (au XVIII^e siècle) en passant par von Martius et von Spyx (au XIX^e siècle), et jusque très récemment, l'Amazonie a fait l'objet de l'intérêt des scientifiques. Cependant, ces études n'ont été qu'une goutte d'eau dans la mer d'ignorance qui persiste. Face à une telle ignorance, la motivation du colonisateur a été utilitaire. Les Jésuites ibériques recherchaient des herbes médicinales tout en subvertissant la culture des peuples indigènes dans le processus de catéchisation. À partir du XIX^e siècle, l'extraction du caoutchouc s'est appuyée sur les établissements riverains pour développer un système mercantile international. Les colons, pris en charge par des programmes gouvernementaux dans la seconde moitié du XX^e siècle, ont été installés dans des établissements ruraux pour affronter « l'enfer vert » et tenter d'y recréer le même type de production rurale qu'ils avaient appris dans leurs régions d'origine, totalement différentes de la réalité socioculturelle et environnementale amazonienne. Les mineurs, les chercheurs d'or et les bûcherons ont été attirés par la possibilité de richesse et le rêve d'une prospérité rapide, ne laissant que dévastations dans leur sillage. Le résultat, inévitablement, a été la désadaptation des peuples traditionnels, la dégradation de l'environnement, les conflits socio-environnementaux et culturels. En bref, une énorme perte de patrimoine environnemental et culturel.

La façon dont les gouvernements successifs ont traité l'Amazonie est le reflet de l'ignorance et de l'inadéquation, mais aussi de l'arrogance des pouvoirs publics, qui dictent des politiques déconnectées de la réalité amazonienne. Nous pouvons donc constater qu'il existe encore de nombreuses questions auxquelles il n'y a pas de réponses sûres et de nombreuses réponses (actions) qui sont données sans connaître les véritables questions.

Jusqu'à présent, la vocation de la région n'a pas été clairement définie pour servir de guide aux politiques à long terme. Nous ne savons pas avec certitude quelles sont les potentialités (nous savons qu'elles sont nombreuses...) et quelles sont les limites (nous sommes sûrs qu'elles sont inquiétantes...). Nous savons que la dynamique de la forêt a des répercussions sur le climat de la planète, mais nous ne savons pas avec certitude dans quelle mesure, et quel est, en fait, l'ordre de grandeur des changements climatiques mondiaux qui résultent ou résulteront des altérations physiques de l'immense forêt tropicale.

Nous sommes pleinement conscients que la forêt cache et recouvre un énorme potentiel économique, qu'il s'agisse de substances pharmaceutiques, de cosmétiques, d'aliments, de minéraux et de nombreux autres produits, ligneux ou non. Mais nous ne savons pas comment les exploiter de manière rationnelle et durable. Comment éviter que les utilisations potentielles de cette richesse soient recherchées, appropriées et brevetées sans se traduire par des avantages pour les communautés locales, la région ou le pays ?

Nous connaissons les avantages comparatifs de disposer d'une gigantesque source d'eau douce, mais nous ne savons pas comment l'exploiter économiquement au profit des populations locales et de manière durable. Jusqu'à présent, nous avons surtout réussi à produire de l'électricité en construisant de grands barrages qui entraînent une dégradation de l'environnement et ont des effets sociaux négatifs, et qui ne contribuent guère au développement durable des communautés concernées. Nous savons que les ressources halieutiques constituent une richesse réelle et potentielle de la région, mais nous ne sommes pas parvenus à transformer cette possibilité en une utilisation durable. La production d'hydroélectricité bon marché, avantage séduisant de la région, rend viables les industries de transformation des minerais coûteuses en énergie, mais ne sert pas les populations riveraines des barrages et des lignes de transmission.

En bref, comme nous n'avons pas encore appris à utiliser les richesses de la région de manière durable, nous continuons à pratiquer le « *dumping* écologique », l'écocide et l'extermination culturelle des peuples autochtones. C'est le revers de la médaille de la quête de la croissance économique, de la vision étroite de l'immédiateté et de la mentalité coloniale.

La liste des questions sans réponses est longue. Et il faut y ajouter les réponses sans questions, c'est-à-dire les actions entreprises sans connaissance préalable du contexte dans lequel elles s'insèrent et des attentes réelles des populations traditionnelles, ou sans analyse prospective de leurs résultats. C'est dans ce sens qu'un réseau complexe d'infrastructures a été mis en place dans la région au cours des dernières décennies. De même, les incitations économiques et une politique de colonisation ont amené des investissements et des flux migratoires dans la région amazonienne, provoquant des effets qui nécessitent des mesures correctives : déforestation, incendies, conflits fonciers, manque d'assainissement environnemental dans les villes, contamination des rivières, épuisement des stocks de poissons, demande de services publics en général.

Des réponses sans questions préalablement formulées et scientifiquement fondées ou des actions sans projet pour la région ont été la clé de voûte de l'intervention publique directe et de l'initiative privée spontanée dans la région amazonienne. L'absence de mécanismes de régulation efficaces a permis que, même après le retrait de certains instruments – tels que les incitations fiscales – la dynamique d'occupation de la frontière amazonienne se maintienne.

La construction d'infrastructures routières obéit à une logique qui tantôt entre en conflit avec les orientations de la réglementation publique en matière d'environnement, tantôt sert de validation *a posteriori* d'un processus spontané et chaotique d'occupation des frontières économiques (agriculture, élevage, industrie minière).

En l'absence de réponses endogènes authentiques aux questions sur l'Amazonie, ce que l'on peut constater, c'est que des initiatives ont été prises qui se révèlent être des « réponses » exogènes.

L'Amazonie est une énigme. Comme le Sphinx de l'œuvre de Sophocle, elle met au défi ceux qui cherchent à la pénétrer : « Déchiffrez-moi ou je vous dévorerais. » Jusqu'à présent, l'énigme n'a pas été élucidée. Cependant, ce n'est pas le colon, le mineur, le bûcheron ou le gros agriculteur qui se font dévorer. Les victimes sont la forêt, les rivières, la faune, les richesses naturelles, la culture et les peuples traditionnels. Et, par conséquent, toute la dynamique climatique de notre planète est affectée. Il n'a jamais été aussi urgent de mieux connaître, de déchiffrer ce sphinx !

Face à ce contexte défavorable d'inadéquation des interventions humaines et d'ignorance des capacités et des limites de l'Amazonie, le rôle de la science est essentiel. Il y a beaucoup à étudier, et pour cela la voie comporte impérativement une base institutionnelle solide et la mobilisation des chercheurs dans des initiatives *ad hoc* durables et collaboratives.

Cet ouvrage constitue une expression remarquable de l'effort pour déchiffrer l'énigme, et pas seulement par la ruse. Il est le résultat d'activités de recherche systématiques, réunissant une grande communauté internationale, interdisciplinaire et interinstitutionnelle, sous la direction de l'IRD, en partenariat avec des chercheurs de diverses institutions travaillant dans la région. Il représente une avancée majeure pour la connaissance, tout en configurant un *modus operandi* créatif et fructueux pour mener des études en collaboration entre domaines scientifiques, entre institutions de recherche et entre acteurs.

Fondés sur des questions intéressant les sciences naturelles et les sciences de la vie, ces travaux conduisent également à des résultats de grande valeur pour les sciences humaines et sociales. Cet ouvrage offre ainsi un appui permettant de prendre de meilleures décisions concernant les politiques et pratiques socio-économiques dont l'Amazonie est l'objet.

Nous trouvons, tout au long des chapitres, des éléments qui permettent d'expliquer comment différents aspects de la réalité actuelle sont en jeu, parmi lesquels :

- le facteur humain (la présence de la population « immigrée ») et ses effets perturbateurs sur la culture traditionnelle ;
- le facteur démographique (dans lequel se distingue le processus d'urbanisation accélérée de la région) ;
- le facteur économique (caractérisé par l'avancée de la frontière agroalimentaire, l'exploitation minière, la production d'énergie et l'émergence d'activités industrielles) ;
- le facteur climatique (et son rôle dans le régime des précipitations et des températures) ;
- le facteur socioculturel (notamment dans ses implications sur les modes de vie des populations traditionnelles, l'agriculture familiale et la pêche artisanale) ;
- le facteur sécuritaire (compte tenu de la présence croissante de la criminalité organisée), qui est aggravé par l'absence de l'État et de ses mécanismes de gouvernement sur le territoire.

Il convient d'ajouter que, de par la manière dont il a été conçu et rédigé, l'ouvrage est accessible et intelligible à un public plus large que celui du monde académique. Il s'agit donc d'un outil pertinent tant pour la communication scientifique que pour la prise de décision. Une avancée importante pour que l'énigme amazonienne soit mieux comprise et, qui sait, un jour déchiffrée.

Préface

Amazonie : la recherche et son contexte

PHILIPPE LÉNA
Géographe,
directeur de recherche émérite de l'IRD

Par l'ampleur et la rapidité des transformations d'origine humaine qu'elle subit, l'Amazonie est une excellente illustration de ce qu'il est aujourd'hui convenu d'appeler l'« Anthropocène ». Pour l'historien Dipesh Chakrabarty, cette période marque la rencontre entre l'histoire sociale et l'histoire naturelle, autrement dit l'intrication de deux temporalités qu'il nous était jusqu'à récemment possible d'étudier séparément. L'accélération de phénomènes globaux comme le réchauffement climatique et l'effondrement de la biodiversité en témoigne. La destruction des forêts (et de la végétation naturelle en général) joue un rôle majeur dans cette dynamique. Or les forêts tropicales sont défrichées à un rythme soutenu, essentiellement par l'agriculture industrielle et l'élevage, malgré les alertes des scientifiques concernant leur rôle dans le maintien de la biodiversité et de la circulation atmosphérique, autrement dit de l'habitabilité de la Terre. L'Amazonie occupe une place importante dans ces équilibres régionaux et planétaires, et sa réduction et sa dégradation pourraient, d'après les spécialistes, entraîner un effondrement écologique de grande ampleur dans un avenir proche. Deux résultats scientifiques récents vont dans ce sens. D'une part, la mise en évidence de ce que l'on a appelé les « rivières volantes », c'est-à-dire la circulation de courants atmosphériques chargés de l'humidité produite par la forêt et qui alimente en eau les zones agricoles les plus productives du Brésil ainsi que les usines hydroélectriques¹ : or une diminution des pluies, attribuée à la déforestation de l'Amazonie, est observée ces dernières années dans

1 – Signalons ici les travaux pionniers du professeur Eneas Salati, qui fut directeur de l'INPA (Manaus) de 1979 à 1981 puis au début des années 1990. Travaux poursuivis par Antônio Nobre, Carlos Nobre, José Marengo, etc.

2 – Voir GATTI L.V. *et al.*, 2021 – Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595 : 388-393.

ces régions. D'autre part, des chercheurs² ont montré que la forêt tend à voir diminuer son rôle de puits de carbone et à devenir émettrice nette. On constate en effet une baisse des précipitations, une diminution de l'humidité ainsi qu'un allongement de la saison sèche dans de grandes régions de l'Amazonie. Un point de non-retour semble en train d'être atteint.

Par ailleurs, les peuples traditionnels qui habitent ces forêts et en vivent sont partout menacés, non seulement dans leur mode de vie (accaparement des terres, expulsion) mais également dans leur simple survie (atteinte à leur intégrité physique). La préservation des écosystèmes forestiers est donc indissolublement une question environnementale et sociale. D'où la pertinence du néologisme brésilien « socio-environnemental » pour s'y référer.

Depuis la période coloniale, l'expansion des frontières intérieures et la recherche de richesses destinées à l'exportation sont une constante. L'Amazonie y a participé à sa façon (migrations nordestines venues pour exploiter le caoutchouc et les produits forestiers), sans qu'il y ait pour autant continuité territoriale de la dynamique de peuplement à partir de la zone côtière, comme ce fut le cas pour le reste du Brésil. La forêt amazonienne demeurait largement intacte et représentait une sorte d'obstacle à une exploitation de grande ampleur. Tout changera à partir du plan intitulé « Opération Amazonie » (1968) et des différents projets d'occupation-exploitation des gouvernements civils ou militaires. L'ouverture de routes a donné accès au cœur de la région et des projets de colonisation ont été installés tout au long, prévoyant des lots pour la polyculture familiale et de grandes propriétés destinées à l'élevage bovin. C'est le début des grands défrichements dont les superficies sont calculées par l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) depuis 1988 grâce à l'imagerie spatiale. Jusqu'en 2004, ils oscilleront entre 11 000 et 29 000 km²/an. La poursuite du projet colonisateur, de « l'intégration nationale », est clairement assumée, y compris dans les termes.

Les thématiques de recherche, les questionnements vont évoluer en même temps que leur objet, ils vont s'adapter et développer de nouvelles problématiques et méthodes. Ainsi la plupart des recherches effectuées jusqu'en 1990 sur la société régionale ou les formes de colonisation (agraire, minière, industrielle) sont de type classique, elles s'inscrivent dans le paradigme dominant de l'époque qui est la question du développement. En général, de façon critique. Mais la question de l'environnement, bien que présente, est rarement première.

D'importants changements vont venir de plusieurs directions à partir de la fin des années 1980. L'expansion coloniale se heurte aux territoires indigènes et aux formes d'occupation traditionnelles, dont les populations commencent à s'organiser pour résister. Des chercheurs et des ONG se

mobilisent. Grâce aux avancées permises par la Constitution de 1988, des revendications territoriales s'expriment : reconnaissance de « Territoires indigènes », de réserves extractivistes, d'aires protégées, habitées ou non. La Conférence des Nations unies pour l'environnement et le développement tenue à Rio de Janeiro en 1992 se déroule sous une pression internationale visant à contenir la déforestation et avec la participation de la société civile. Le Programme pilote pour la conservation des forêts tropicales du Brésil (PPG7), financé en grande partie par le G7 à travers la Banque mondiale, est lancé en partenariat avec le gouvernement brésilien. Ce programme crée une multitude de projets locaux de développement prenant en compte la dimension environnementale, ils sont destinés aux agriculteurs familiaux, aux populations riveraines, extractivistes et amérindiennes. De nombreuses recherches réalisées par l'IRD et ses partenaires vont s'inscrire sous la bannière du développement durable, fût-ce pour en critiquer les approches par trop économicistes et financières (mécanismes de marché). C'est aussi le moment où les programmes de recherche pluridisciplinaires deviennent la règle.

Les mesures prises ne parviennent cependant pas à freiner l'expansion spatiale de l'agro-industrie (en particulier l'industrie de la viande) et les défrichements ne baissent pas. Le nouveau gouvernement du Parti des travailleurs qui arrive au pouvoir en janvier 2003 connaît même en 2004 le taux de défrichement le plus élevé (27 772 km²) depuis le record absolu de 1995. Dès 2004, il lance le Programme de prévention et contrôle de la déforestation en Amazonie (PPCDAm) ainsi qu'une série de politiques articulées qui, pour la première fois, mènent à une baisse régulière des défrichements, réduits à 4 571 km² en 2012. Durant cette période, les programmes financés par l'Agence nationale de la recherche française permettent d'étendre les partenariats et de multiplier les lieux d'étude dans une perspective comparatiste. Les sciences naturelles et sociales sont souvent associées au sein d'un même projet. Pour ce qui concerne les sciences sociales (au sens large), les populations locales et leurs associations deviennent des partenaires incontournables. Notamment autour de la réalisation de cartes participatives avec l'aide d'images satellitaires.

Cette dynamique se poursuit durant les années suivantes malgré des conditions moins favorables. Entre 2013 et 2018, les groupes de pression liés à l'agro-industrie obtiennent quelques assouplissements des régulations environnementales, et on note une tendance à l'augmentation des défrichements, qui atteignent 7 536 km² en 2018.

Les taux de défrichement sont un bon indice de la puissance de la dynamique coloniale, et donc des conflits. De 2018 jusqu'à 2022, ce sont quatre années de suite d'augmentation des défrichements, qui atteignent 13 235 km² en 2021, et les données partielles de 2022 indiquent un nouveau dépassement. L'appropriation illégale de terres publiques, l'exploitation illégale de bois, l'orpaillage illégal ont toujours existé, mais c'est leur échelle et leur localisation

qui font la différence. On estime que 99,8 % des défrichements de 2020 étaient illégaux (L. Marques). Par ailleurs, après que 600 000 km² ont été défrichés depuis 1980, principalement le long des principales routes, ou à distance raisonnable, l'expansion spatiale de l'extractivisme (agro-industrie, exploitation minière, bois, barrages...) s'attaque maintenant aux aires protégées, en particulier aux Terres indigènes et aux zones occupées par des populations traditionnelles. La multiplication des conflits pose de nouvelles questions à la recherche. Que ce soit au niveau physique (contamination par le mercure et les pesticides, modifications des écosystèmes...) ou social (assassinats, perception de la violence, fractures sociales, coopérations...). On peut également s'interroger sur le fait que les lieux où les défrichements et les conflits sont les plus intenses sont ceux où les politiciens locaux qui adhèrent à la dynamique prédatrice sont plébiscités.

D'autres questions se posent au niveau géopolitique. En 2020, l'économie mondiale a consommé 100,6 Gt de ressources naturelles (une infime partie venant du recyclage), et cette quantité ne peut qu'augmenter, accentuant la pression extractiviste sur les régions encore riches en ressources potentielles, et donc sur les peuples et les écosystèmes. Pression relayée par les agents économiques qui en tirent bénéfice au niveau national, régional et local. Quelles transformations et régulations seraient-elles nécessaires pour y faire face ?

Ces nouveaux développements posent indiscutablement une question et de nouveaux défis aux scientifiques, habitués à considérer des faits plutôt que des finalités, le « comment » plutôt que le « pourquoi »... Face à l'effondrement écologique planétaire en cours, la dimension axiologique devient cependant incontournable. Elle est présente de façon croissante au sein même des conférences internationales (COP, définition d'objectifs globaux...) et dans l'approfondissement de diverses approches pour lesquelles l'éthique est centrale : justice climatique, justice environnementale, droits de la nature, etc. Cette dimension est également de plus en plus présente dans les démarches de recherche.

Il est important de noter que le nombre de recherches réalisées en Amazonie a énormément augmenté durant les trente dernières années, en particulier celles qui sont menées par des chercheurs de la région. Il en va de même du nombre de thèses, notamment ces dernières années.

Quels que soient la période et le contexte, l'IRD a pu, depuis plus de quarante ans, collaborer avec un nombre important d'institutions scientifiques brésiliennes et amazoniennes, et contribuer avec ses partenaires à l'augmentation des connaissances, que ce soit sur le fonctionnement des écosystèmes amazoniens, les formes de leur utilisation par les populations traditionnelles ou originaires d'autres régions, ou encore les dynamiques qui conduisent à leur dévastation. Le présent volume en est une bonne illustration.

Sa présentation et la richesse de son contenu inciteront certainement le lecteur à sortir des disciplines qui lui sont familières pour se laisser guider par sa curiosité et défricher des domaines qui lui sont mal connus... comme l'ont fait beaucoup de chercheurs qui ont participé à des programmes pluridisciplinaires !

Introduction

CATHERINE AUBERTIN
Économiste de l'environnement,
directrice de recherche à l'IRD

Ce recueil marque une étape dans les recherches menées conjointement par les équipes brésiliennes et françaises en Amazonie. En effet, la violence et l'enchaînement des événements climatiques, écologiques et politiques font bouger les lignes. Pour y répondre, les approches disciplinaires s'hybrident, les échelles temporelles et spatiales s'élargissent, les scientifiques établissent le dialogue et s'engagent auprès des populations locales, la barrière entre nature et culture s'estompe. Plus que jamais, la connaissance est mobilisée pour défendre les conditions d'habitabilité des écosystèmes de la planète.

Dans l'urgence écologique et politique que nous vivons, l'Amazonie fait figure d'allégorie. Sa démesure en termes de surface de forêts tropicales, de cours d'eau et de zones humides, de richesses de ressources biologiques et minières, de diversité de peuples autochtones et de communautés locales, de menaces qui pèsent sur elle... en fait définitivement un symbole pour la lutte contre la destruction de la biodiversité et des peuples.

Entre rêve d'une nature intouchée et rêve de conquête, l'Amazonie a toujours nourri espoirs et désespoirs. Elle reste cette Amazonie du futur où peut se jouer l'avenir de la planète. Si le président Lula nouvellement élu a mis comme priorité sa lutte contre la faim et le rétablissement du dialogue démocratique avec la société, il a aussi déclaré que le Brésil et la planète avaient besoin d'une Amazonie en vie.

L'histoire de l'Amazonie ne débute pas avec la colonisation, et nos recherches en témoignent. Ses écosystèmes forestiers ont été depuis près de dix mille ans parcourus et modifiés par l'action humaine. Elle est le foyer de la domestication de nombreuses espèces végétales ; c'est aussi l'espace où se sont forgées de multiples sociétés le plus souvent en interactions. L'Amazonie fait partie de l'histoire pionnière du Brésil, quand il faut repousser toujours plus à l'ouest, contre la forêt et les Amérindiens, la ligne de partage avec la couronne espagnole jusqu'à consolider aujourd'hui des frontières avec sept autres pays. De tout temps, le Brésil a dû affirmer sa souveraineté, que cela soit devant la volonté d'internationalisation de la navigation de l'Amazone au XIX^e siècle ou face aux intérêts stratégiques d'approvisionnement en caoutchouc des États-Unis pendant la Seconde guerre mondiale. Aujourd'hui

l'Amazonie, en particulier dans sa partie brésilienne, est au cœur des débats environnementaux. La colossale portée des processus écologiques qui y opèrent fait de ce patrimoine brésilien un bien dont l'intérêt dépasse les frontières nationales. Par sa biodiversité, ses services écosystémiques de régulation des pluies ou comme lieu de vie des peuples autochtones, elle constitue une pièce maîtresse sur l'agenda des négociations internationales. Si son rôle de poumon de la planète est remis en cause, les négociations de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (CCNUCC) la voient toujours comme un puits de carbone susceptible de compenser les émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés.

Il est ainsi possible de rendre compte des avancées et des reculs de la politique brésilienne vis-à-vis de l'Amazonie, mais aussi vis-à-vis de la communauté internationale, à partir des engagements du Brésil auprès de la CCNUCC.

C'est avec l'engagement volontaire de réduire les émissions de gaz à effet de serre (EGES) à l'horizon 2020 que le président Lula, profitant de la scène internationale offerte par la COP 15 Climat de Copenhague en 2009, sacre le Brésil champion de l'environnement. Il met au centre de sa stratégie de lutte contre le changement climatique sa lutte contre la déforestation : la politique nationale sur le changement climatique fixe une baisse de 80 % du rythme de déforestation de l'Amazonie par rapport à la période 1996-2005, et de 40 % pour le biome Cerrado par rapport à la période 1999-2005.

La déforestation de l'Amazonie jusqu'aux années 2000 a été liée à son mode d'occupation, selon le mythe de la Frontière impulsé par l'État fédéral : le long des routes et dans les projets de colonisation ; dans les fronts pionniers agricoles suivant « l'arc de déforestation » à l'occasion de l'ouverture des routes fédérales, des projets miniers et des constructions de barrages hydroélectriques. Cela prend fin avec le choc de la déforestation record de 27 772 km² en 2004. Le Plan d'action pour la prévention et le contrôle de la déforestation dans l'Amazonie légale (PPCDAm) est mis en place, ainsi que toute une série de mesures : capture de fonds internationaux via le fonds Amazônia, contraintes sur les crédits agricoles, contrôle satellitaire, renforcement des agences d'environnement comme l'Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) et l'Institut Chico Mendes, création d'aires protégées, légalisation de Terres indigènes et de quilombolas (terres occupées par les Afro-descendants)...

Bien sûr, la base de référence a été judicieusement choisie et, à Copenhague, la déforestation n'était plus que de 5 000 km², en baisse constante depuis 2004. L'objectif était déjà presque atteint. Aussi le Brésil a-t-il pu se monter triomphant lors de l'annonce de sa « contribution nationale prévue et déterminée » (INDC) à la COP 21 de Paris de 2015, avec un objectif de

réduire les EGES, par rapport à 2005, de 37 % en 2025 et de 43 % en 2030. Il confirme sa politique avec des objectifs de zéro déforestation illégale et de totale compensation des émissions de CO₂ dues à la suppression légale de végétation à l'horizon 2030. S'y ajoutent la promotion d'un plan d'agriculture bas carbone (ABC) et celle du nouveau code forestier.

Ces actions sont soutenues par la société civile, dont la participation est requise dans les nombreuses instances de gestion. Le mouvement socio-environnemental fait coïncider les luttes pour la justice sociale et celles pour la justice environnementale, alors que les entreprises privées liées à la production du soja et du bœuf imposent des moratoires sur les produits venant de zones déforestées. Les chercheurs ne sont pas en reste. Ils ont trouvé leur place au sein de la société civile pour développer les sciences de l'environnement, grâce aux projets soutenus par le CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) et à leurs partenariats avec l'Université, l'INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), l'Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), l'IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional), le Musée Goeldi... L'époque était pleine d'espoir devant une déforestation en chute libre et la création d'aires protégées, la démarcation de Terres indigènes et de quilombolas. Des inquiétudes se faisaient jour cependant pour le Cerrado, moins médiatique, dont le défrichement a été jusqu'en 2019 plus important que celui de l'Amazonie.

Le mandat du président Bolsonaro s'est traduit par une régression des politiques environnementales, avec l'affaiblissement des entités chargées de l'environnement et toute une série de projets de loi permettant de légaliser l'invasion des terres publiques et l'exploitation des terres indigènes. Malgré la résistance du pouvoir judiciaire à ces projets, le rythme de déforestation, comme celui de la spéculation sur les terres, s'est emballé à la faveur de l'appropriation illégale des terres ainsi organisée.

La contribution du Brésil aux dernières conférences des parties, Climat comme Biodiversité, marque ce recul. Le pays passe du rôle de leader des négociations à celui de pays obstrucateur. Les objectifs de réduction des EGES sont réaffirmés, mais sur une base de référence modifiée rendant l'ambition moindre, violant ainsi le principe de non-régression de l'Accord de Paris. Pour atteindre la neutralité carbone en 2060, le gouvernement Bolsonaro compte sur les mécanismes de marché, et non sur la mobilisation de tous les acteurs ; il s'affirme comme le principal acteur du marché des compensations volontaires du carbone.

Ces instabilités ont eu des répercussions sur les partenariats scientifiques entre le Brésil et la France. Cependant, grâce aux partenariats menés sur le

temps long, le suivi des projets a été possible. Le travail de terrain, avec les populations concernées, s'est renforcé. Les programmes d'échanges pour la formation d'étudiants et d'échanges de chercheurs brésiliens et français se sont poursuivis.

Les programmes de recherche ont accompagné ces nouveaux enjeux socio-environnementaux. D'abord axées sur les inventaires et les connaissances des espèces ou des réseaux hydrologiques, les recherches se sont ouvertes à la gestion des ressources et à la protection de la biodiversité. Les partenariats incluent désormais les agents chargés de l'environnement et les populations locales. L'adaptation des populations aux changements des milieux, auxquels elles contribuent ou qu'elles subissent, est à la fois un sujet d'études collaboratives et un objectif des recherches. Il s'agit d'évaluer les impacts des politiques publiques qui favorisent ou restreignent la déforestation, et des grands projets d'infrastructures (barrages hydroélectriques, routes...) qui bouleversent les territoires.

Cette science engagée, impliquée dans le dialogue avec les sociétés, dessine les bases scientifiques de voies d'adaptation durables. Elle contribue aux avancées technologiques. En particulier, les technologies spatiales, qui permettent de suivre les changements d'usage du sol et s'appliquent désormais à l'hydrologie, couplées aux sciences de l'information et à l'intelligence artificielle, produisent d'énormes quantités de données. Les méthodes de métabarcoding et d'ADN environnemental ont bouleversé les recueils et l'interprétation des échantillons de matière organique récoltés. Une fois traitées, ces données sont mises en libre accès sur des plateformes consultables par tous, et chacun peut s'en saisir pour agir.

Il n'est plus possible de mener des recherches en Amazonie en l'isolant de son contexte géographique et politique, et tout d'abord national, comme nous l'avons vu pour le Cerrado. Les recherches amazoniennes profitent des questions, des expérimentations et des résultats en cours sur les autres continents et autres pays, autant qu'elles les nourrissent. On notera l'importance des comparaisons avec la forêt tropicale mais aussi avec les grands fleuves et les systèmes agricoles d'Afrique, également avec les études menées dans les pays frontaliers et spécialement en Guyane. Les études montrent les imbrications entre les modifications des pluies de l'Amazonie et les climats des pays andins, jusqu'aux pays du cône Sud ou encore du sud de l'Europe. L'herbier du musée Goeldi entretient des échanges soutenus avec l'herbier de Cayenne et avec les grands herbiers internationaux. Les défis environnementaux, changement climatique, érosion de la biodiversité, pollution, dépassent les frontières de l'Amazonie.

Cet ouvrage n'échappe pas à la tradition qui veut que son plan suive le cheminement classique partant des sciences de la Terre aux sciences du vivant pour terminer par les sciences humaines et sociales. Pourtant, ce qui est à souligner ici, la majorité des textes insiste sur l'importance de la pluridisciplinarité et revendique une science à la fois engagée et inclusive. Les questions écologiques et sociales impliquent en effet des visions globales à l'échelle de la planète, mais aussi à l'échelle des écosystèmes et des territoires, acceptant la diversité des mondes.

Aujourd'hui, le président Lula fonde son nouveau mandat sur le rétablissement du dialogue et la participation de la société à l'élaboration des politiques publiques. Il se dit ouvert à la coopération internationale pour préserver l'Amazonie, que ce soit sous forme d'investissements ou de recherche scientifique, en respectant la souveraineté du Brésil.

C'est bien cette science ouverte à la société qui est présentée dans ce recueil.

PARTIE 1

Crue de l'Amazone en 2012,
Iquitos, Pérou.



SUIVRE LES DYNAMIQUES, COMPRENDRE LES PROCESSUS



PARTIE 1



Le bassin amazonien revêt une importance majeure pour l'équilibre hydrologique global et pour le climat de notre planète. Les nombreux barrages en construction ou en prévision vont avoir des conséquences non encore évaluées sur les transferts d'eau et de sédiments du bassin. La qualité des eaux est affectée par les rejets de mines, par les fuites d'hydrocarbures, par les rejets de substances toxiques utilisées en agriculture et par les déchets urbains. La déforestation, responsable de la perte d'habitats et de la fragmentation des écosystèmes, affecte également les transferts hydriques et vient accroître par l'érosion des terres certains transferts de métaux. Or l'information disponible sur le milieu amazonien est encore fragmentaire et non homogène suivant les pays du bassin. Les informations de base sur les processus écosystémiques et sur ceux découlant de l'occupation humaine, ainsi que le suivi dans le temps de ces processus, ne sont que partiellement disponibles pour la société civile en général ou pour les décideurs. Pourtant, les travaux actuels de l'IRD dans le bassin amazonien, enracinés dans une recherche qui s'est poursuivie sur le long terme, menés en partenariat avec de nombreux partenaires académiques et, pour certains, avec les gestionnaires des bassins (observatoire HyBAm), couvrent les champs majeurs de la connaissance nécessaire à la compréhension et au suivi de l'écosystème. L'IRD a en outre développé avec ses partenaires des méthodologies innovantes pour le suivi des ressources qui sont susceptibles de compléter, en les rendant moins coûteux, les suivis traditionnels, tout en les homogénéisant sur l'ensemble du bassin. Cette première partie présente cette information issue de l'observation et du suivi, qui permet de comprendre les processus en jeu et qui est la base de la prise de décision pour la gestion durable des ressources.

1

L'observatoire HyBAm sur les grandes rivières amazoniennes

L'observatoire HyBAm sur les grands cours d'eau amazoniens permet, par son approche pluridisciplinaire et de long terme, par sa structure en partenariat, par le libre accès aux données et une promotion active de la recherche et de la formation, de renseigner et comprendre les changements globaux et locaux (changements massifs d'occupation des sols, déforestation, construction de barrages, exploitation d'hydrocarbures, etc.) affectant le bassin amazonien.

PARTENAIRES

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

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

Senamhi, Bolivie

Agence nationale de l'eau (ANA), Brésil

Direction de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Deal), Guyane Française

Office de l'eau de Guyane

Groupement d'intérêt économique pour le Service commun d'entretien des voies navigables (SCEVN), Brazzaville, République du Congo

Institut vénézuélien de recherche scientifique (Ivic), Venezuela

Institut de géophysique du Pérou

L'Amazone s'écoule avec un débit moyen de 206 000 m³.s⁻¹, ce qui représente environ 20 % des apports continentaux en eaux douces aux océans. Son débit est donc de très loin le plus élevé de tous les fleuves de la planète. Mais il est surtout un bassin versant quasi transcontinental sans aucun équivalent, qui draine environ 4 % des terres émergées, avec de puissants affluents, aussi nombreux que divers. Ce bassin abrite la plus grande forêt tropicale du monde, représentant 58 % des forêts tropicales et plus de 20 % de la biodiversité mondiale. Il agit sur la biosphère à travers les immenses flux d'eau et de matières qui en sortent à l'exutoire, mais aussi vers l'atmosphère (flux d'humidité, gaz à effet de serre) : il contribue à hauteur de 15 % aux flux verticaux d'évapotranspiration continentaux et joue ainsi un rôle majeur dans la circulation atmosphérique globale. Bien qu'elles n'occupent que 11 % de la surface du bassin, les Andes constituent la principale source des apports primaires en sédiments (95 %), mais aussi en éléments dissous et en nutriments (36 %), qui sont transportés par les différents affluents de l'Amazone vers l'océan. Ces flux sont vitaux pour la biodiversité amazonienne et sont à l'origine de la disponibilité de nombreuses ressources naturelles (hydrocarbures, etc.). Les Andes jouent également un rôle déterminant dans les transferts d'eau et de matières par déformation tectonique du bassin en créant des puits de sédiments et en contrôlant la dynamique morphologique des rivières et des plaines d'inondation.

Le bassin de l'Amazone est ainsi une sentinelle de l'impact du changement climatique sur la planète. L'hydrologie de l'Amazone a eu, et a encore aujourd'hui, un impact considérable sur le climat régional et mondial passé et présent (voir chapitres 11 et 12).



© InoUlam N. Flicha

Crue de L'Amazone, Brésil.

Actuellement, l'ensemble du bassin est soumis à de fortes pressions anthropiques : déforestation, agriculture et élevage, exploitation minière légale et illégale, pollution, changements d'affectation des sols dus à l'urbanisation et à la construction de barrages... De surcroît, une accélération des événements extrêmes, inondations et sécheresses, est observée ces dernières décennies, ce qui a un impact considérable sur l'environnement et les populations de toute la région.

Un peu d'histoire

Au Brésil, les chercheurs hydrologues de l'Orstom (prédécesseur de l'IRD) ont principalement travaillé dans la région du Nordeste jusqu'au début des années 1990. En 1981 est créée une implantation permanente de l'Orstom au DNAEE (Département national de l'eau et de l'énergie électrique, remplacé par l'ANA, Agence nationale de l'eau), d'une part pour accompagner l'engagement croissant du Brésil dans le domaine de la gestion des ressources hydriques, et d'autre part grâce à l'intérêt du DNAEE pour les dispositions légales et économiques françaises en matière de gestion de l'eau. Ce besoin de connaissances en gestion de l'eau de la part du Brésil a croisé l'une des grandes évolutions conceptuelles des sciences hydrologiques à l'IRD, qui allait modifier l'approche d'ingénierie hydrologique (donc appliquée et souvent

PARTENAIRES

Centro Regional del Clima para el Oeste de Sudamérica (CIIFEN), Équateur

Université nationale agronomique, La Molina (Unalm), Pérou

Université Mayor de San Andres (Umsa), Bolivie

Université fédérale d'Amazonas (Ufam), Brésil

Université de Brasilia (UnB), Brésil

Université fédérale Fluminense, Brésil

Université centrale du Venezuela (UCV)

Université Marien Ngouabi (UMNG), Brazzaville, République du Congo

ponctuelle) vers la connaissance de l'enveloppe fluide de la terre (ce concept a évolué aujourd'hui vers celui de « zone critique ») et des transferts d'eau et de matières à travers les continents et vers les océans. Cette évolution est d'abord apparue en Afrique, mais s'est très vite intéressée au plus grand objet hydrologique du monde : le bassin amazonien.

Pour mettre en œuvre cette nouvelle approche, il a d'abord fallu s'atteler à construire des bases de données hydrologiques facilement accessibles à tous. À l'inverse des coopérations scientifiques d'autres pays, l'IRD s'est donc orienté vers la mise en place de réseaux de mesures sur le long terme, ce qui l'a poussé à construire des partenariats durables avec nombre d'institutions, d'agences et d'université dans le bassin amazonien. De ce fait, l'IRD a pu conduire un travail approfondi de renforcement de capacités et de formation d'étudiants, dont beaucoup ont achevé leur cursus en France au niveau doctoral. Certains de ces étudiants sont revenus ensuite dans leur pays pour diriger à leur tour des recherches qui sont reconnues internationalement.

Les programmes HyBAm au Brésil – qui a préfiguré l'observatoire du même nom – et Phicab en Bolivie (1982-1992) sont emblématiques de cette nouvelle approche. Tous deux avaient pour objectif la quantification des transferts d'eau et de matières par les fleuves amazoniens, depuis les Andes vers l'Atlantique, ainsi que la compréhension des mécanismes qui contrôlent ces transferts. À partir de 1992, le programme HyBAm a démarré une coopération avec les sept autres pays qui ont signé en 1978 à Brasilia le traité de coopération amazonienne. À partir de ces deux programmes régionaux, l'observatoire de recherche en environnement (ORE) HyBAm est créé en 2003 pour renseigner et comprendre l'impact des changements globaux affectant les trois plus grands fleuves tropicaux du monde (Amazone, Congo, Orénoque), en se focalisant sur l'observation à long terme des dynamiques hydro-sédimentaires et géochimiques. L'observatoire est désormais formé par 18 institutions partenaires (universités, agences et services hydrométriques) et s'appuie sur un réseau de 42 stations hydrologiques (dont 17 labellisées par le CNRS et l'Institut national des sciences de l'univers [Insu]), réparties sur sept pays (Brésil, Équateur, Pérou, Bolivie, Venezuela, Congo et Guyane Française) et trois continents. Labellisé Service national d'observation (SNO) en 2016, HyBAm est aujourd'hui soutenu financièrement par l'IRD, le CNRS, l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) et les structures des partenaires au Sud. Depuis 2011, il participe des Systèmes d'observation et d'expérimentation sur le long terme pour la recherche en environnement (SOERE) et Réseaux des bassins versants (RBV) et a intégré l'infrastructure de recherche Ozcar.



Mesures hydrauliques sur les fleuves amazoniens.

Le SNO HyBAm a pour missions de :

- créer de la donnée hydrologique, sédimentaire et géochimique en couplant observations *in situ*, observations spatiales et analyses en laboratoires ;
- mettre cette information à la disposition de la communauté scientifique via un portail web, régulièrement actualisé ;
- mener des actions de formation à destination de la communauté technique et scientifique du Sud travaillant sur les ressources en eaux dans la région amazonienne ;

– participer à l'analyse et à la valorisation des données produites au travers de publications, d'activités d'animation et de programmes de recherche, au sein desquels sont réalisés des masters et des doctorats (étudiants du Nord et du Sud).

Depuis sa création, l'observatoire HyBAm a permis de quantifier, le plus souvent pour la première fois, les flux d'eau et de matières des grandes rivières amazoniennes et de construire sur le long terme des bases de données robustes. Il a ouvert et servi de support à de nombreuses voies de recherches, parmi lesquelles l'utilisation de données spatiales pour le suivi des ressources en eau, ainsi que l'étude des *várzeas*, zones d'inondation qui sont le siège d'échanges complexes avec le fleuve. La compréhension de ces échanges latéraux est en effet indispensable pour établir le bilan d'eau et de matières du fleuve, ceux-ci étant du même ordre de grandeur que les flux délivrés à l'océan par le fleuve Amazone.

Comment se fait la surveillance du bassin ?

L'opération d'un réseau hydrologique sur une zone aussi vaste et sur des stations de mesures souvent difficiles d'accès n'est pas une tâche facile. Le réseau hydrographique de l'Amazone est formé par des rivières de plusieurs milliers de kilomètres de long, avec des tronçons de plus de 10 km de large, jusqu'à 100 m de profondeur et des pentes très faibles (de l'ordre du centimètre par kilomètre). Il a donc fallu inventer des protocoles de mesure adaptés à ces rivières hors du commun.

C'est ainsi l'avènement d'une véritable révolution technique pour la mesure des débits dans les grands fleuves, l'ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), qui a permis au SNO HyBAm d'établir les toutes premières courbes de tarage et de quantifier les débits des principaux cours d'eau amazoniens. Cette technique permet en effet de décrire intégralement le champ des vitesses dans une section à partir de mesures détaillées, précises et à haute fréquence, dans des rivières larges et profondes, c'est-à-dire là où les techniques traditionnelles de jaugeage s'avéraient chronophages, complexes, imprécises, incomplètes, coûteuses, dangereuses, voire matériellement impossibles à mettre en œuvre.

Depuis 2003, entre deux et quatre campagnes par an dédiées à la mesure ADCP des débits pour l'établissement de courbes de tarage hauteur/débit sont réalisées dans chaque station, en prenant soin de couvrir une large gamme de conditions hydrologiques. Une attention particulière a été portée sur la mesure d'amont en aval des événements extrêmes, comme les crues historiques de 2012 et 2015 sur l'Amazone ou de 2014 sur le Madeira, et les étiages les plus sévères jamais enregistrés : 2005 et 2010.

Par ailleurs, les chroniques de hauteur d'eau collectées dans chaque station par des observateurs ont été patiemment critiquées et étendues par les ingénieurs de l'observatoire. Ces données sont essentielles, car elles permettent de calculer les débits d'eau, puis les flux de matières. Au besoin, les données *in situ* sont complétées ou critiquées avec des données satellitaires de hauteur d'eau (altimétrie spatiale). L'observatoire a par ailleurs développé des logiciels pour le traitement et la bancarisation des données hydrologiques et spatiales.



Mesure par ADCP.

Afin de prendre en compte la variabilité temporelle des concentrations moyennes transportées par les grandes rivières d'Amazonie au cours du cycle hydrologique, le SNO HyBAm a opté pour une stratégie de suivi inframensuel des concentrations par une méthode d'échantillon indice : sur chaque site de mesure, un observateur prélève régulièrement un échantillon, à la surface de la rivière et en respectant un plan d'échantillonnage. Le plan d'échantillonnage est variable selon les stations, afin de s'adapter aux hydrogrammes observés. Ces mesures *in situ* sont complétées avec des concentrations extraites d'images satellitaires en utilisant les algorithmes développés au cœur de l'observatoire. Lors des campagnes dédiées aux mesures ADCP de débit, ces prélèvements sont complétés par un échantillonnage détaillé de la section entière : ces mesures permettent d'établir une calibration entre l'échantillon indice prélevé par l'observateur et la concentration moyenne effectivement transportée par la rivière.

Ainsi, il a été estimé que le débit solide du fleuve Amazone est d'environ 1 100 millions de tonnes/an, avec un apport total de sédiments de la chaîne andine de 1,3 milliard de tonnes/an (environ 500 km³). Depuis 2003, 1 200 mesures ADCP de débit ont été effectuées, ce qui correspond à 300 missions sur le terrain, plus de 20 000 échantillons de matières en suspension (MES) ont été collectés, 140 000 données géochimiques produites. Grâce à ces mesures, 14 000 000 données de flux journaliers ont été produites. Après évaluation, ces données sont archivées et partagées en ligne sur le site de l'observatoire.

Quels sont les défis à relever pour ce bassin en transition ?

Face à la pression anthropique et aux défis des changements globaux (changement climatique et déclin de la biodiversité), le bassin de l'Amazone connaît des changements majeurs. Dans ce contexte, l'observatoire régional HyBAm dispose, dans ses bases de données, d'une partie du passé et du présent des rivières, un outil fondamental pour pouvoir mesurer l'ampleur des changements actuels et à venir, ainsi que pour interpréter l'origine de ces changements. De ce fait, au niveau scientifique, il est essentiel de continuer à maintenir les stations, ce qui implique de fournir les ressources financières et humaines nécessaires à cette tâche.

Dans le même temps, l'observatoire continue à faire évoluer ses protocoles de mesures et à innover pour améliorer encore davantage la qualité de ses mesures, augmenter les variables observées et affiner spatialement ses bilans de matières : HyBAm ne compte en moyenne qu'une station tous les 180 000 km² dans le bassin amazonien. L'observatoire développe ainsi une approche de suivi intégré des flux hydro-sédimentaires en couplant observation satellitaire et modélisation hydrologique, permettant, en calibrant et validant cette approche sur ses stations et observations *in situ*, de créer des stations dites « virtuelles » (c'est-à-dire sans observations *in situ*) pour compléter efficacement le réseau de mesures.

Enfin, au niveau sociétal, il existe des défis majeurs. L'Amazonie est un monde où les rivières sont à la fois ressources et voies de communication pour les populations riveraines. Par conséquent, les événements extrêmes signifient la perturbation des voies de communication et des difficultés d'accès aux

services de base tels que la santé ou l'éducation, pour des milliers de personnes. En ce sens, une initiative numérique a été créée : Rios OnLine, un projet de science citoyenne et de diffusion, conçu par des chercheurs et des étudiants de l'université fédérale d'Amazonas (Ufam), de l'Institut national de recherche amazonienne (Inpa) et de l'université d'État d'Amazonas (UEA), et qui va de pair avec l'observatoire. Son objectif est de diffuser les connaissances hydrologiques d'une manière compréhensible pour le grand public par le biais d'une plateforme web. Elle dispose également d'un compte de média social qui publie des photographies de rivières prises par des habitants. Grâce à des initiatives de ce type, HyBAm espère sensibiliser la population et entamer un dialogue citoyen afin de mieux s'adapter aux changements à venir (voir chapitre 13).

Pour en savoir plus

<https://hybam.obs-mip.fr/>

<https://sites.google.com/view/rios-on-line/>

www.instagram.com/rios_online/

Ont participé aux observations (liste non exhaustive)

William Santini (IRD), Naziano Filizola (Ufam), Jean-Michel Martinez (IRD), Jean-Loup Guyot (IRD), Rodrigo Pombosa (Inamhi), Philippe Vauchel (IRD), Marco Paredes (Senamhi Pérou), Jhonatan Pérez (Senamhi Pérou), Pascal Fraizyt (IRD), Erick Paredes Vásquez (Autoridade Local del Agua, ALA, Atalaya, Pérou), Hugo Cutile (Senamhi Bolivie), Oscar Puita (Senamhi Bolivie), David Terrazas (Senamhi Bolivie), André Martinelli (Service géologique du Brésil, SGB-CPRM), Franck Timouk (IRD), Alain Laraque (IRD), Jean-Claude Doudou (IRD), Guy Moukandi (UMNG), Christelle Lagane (IRD), Jonathan Prunier (IRD), Noré Arevalo (Unalm), Hector Calle (Senamhi Bolivie), Keila Aniceito (Ufam), Ana Emilia Diniz (Ufam), Leylane Corrêa (Ufam), Gérard Cochonneau (IRD), Elisa Armijos (IGP), Franklin Mujica (Senamhi Bolivie), Grover Apaza (Senamhi Bolivie), Waldo Lavado (Senamhi Pérou), Jorge Carranza (Senamhi Pérou), Nilton Fuertes (Senamhi Pérou), Marjorie Gally (OEG), les marins Bosco et Baxinho.

Mesurer la diversité forestière

Représentant environ 45 % des forêts tropicales du monde,
l'Amazonie est l'écosystème terrestre
le plus diversifié de la planète.

La superficie totale de ce biome
de près de 7 millions de kilomètres carrés
– 25 fois la taille du Royaume-Uni –
est partagée par 9 pays d'Amérique du Sud.



Canopée en Guyane.

Contexte

Peut-être en raison de son immensité, la forêt tropicale a été perçue comme un lieu vaste, inhospitalier, sauvage et homogène. Pourtant, comme nous le verrons dans la troisième partie de cet ouvrage, la seule Amazonie brésilienne est habitée par plus de 180 peuples autochtones, mais aussi par plus de 1 000 communautés quilombolas (communautés formées par des descendants d'esclaves pratiquant l'agriculture), et sa population a été estimée à 20 millions d'habitants en 2000. Même si la population d'occupation récente est surtout concentrée dans les centres urbains que compte chaque État de l'Amazonie brésilienne (États de l'Acre, de l'Amapá, de l'Amazonas, du Pará, du Rondônia, du Roraima et une partie des États du Mato Grosso, du Tocantins et du Maranhão), la diversité du biome amazonien a été de tout temps exploitée par les populations autochtones et rurales traditionnelles, et continue à l'être aujourd'hui.

Les études sur le domaine forestier amazonien ont commencé à l'Orstom/IRD suivant deux voies différentes : une voie agronomique, à Belém, avec les premiers liens entre l'Institut amazonien de Belém et l'Institut de développement économique et rural tropical (Idert) d'Adiopodoumé, et la découverte, lors d'une première mission en Amazonie du spécialiste d'agronomie tropicale et de phytopathologie Georges Mangenot, de l'extrême ressemblance physiologique et donc écologique entre l'Amazonie, l'Afrique de l'Ouest forestière, le Cameroun et la cuvette congolaise. La deuxième est une voie botanique puis ethnologique, avec l'implantation d'une équipe à l'Institut national de recherches amazoniennes (INPA) à Manaus à partir de 1992 (Jean-Louis Guillaumet), pour étudier les modifications écologiques dues à l'exploitation agrosylvopastorale de la forêt.

La forêt tropicale amazonienne est le principal puits de carbone terrestre de la planète, capturant le gaz carbonique de l'atmosphère grâce au mécanisme



Forêt, Guyane.

de la photosynthèse. On pourrait supposer qu'une forêt « en équilibre », qui croît autant qu'elle meurt, est neutre du point de vue du bilan de carbone. Les études récentes cherchent à établir dans quelle mesure la déforestation transforme la région amazonienne en source de carbone, et comment la fonction de puits des parties encore forestières évolue dans un contexte de changement climatique. Ces questions ne sauraient être élucidées sans une connaissance des schémas de variabilité « naturelle » de la forêt et des impacts des modifications climatiques et anthropiques.

L'Amazonie présente une extrême hétérogénéité spatiale et temporelle, à toutes les échelles d'observation. Les recherches sur cette écologie spatiale, qui ont démarré au Brésil, sont centrées aujourd'hui sur la Guyane et sur le réseau de parcelles permanentes d'inventaires d'arbres, mais se maintiennent au Brésil au travers des réseaux Rainfor (Amazon Forest Inventory Network, <http://www.rainfor.org>) et Amazon Tree Diversity Network (ATDN, <https://atdn.myspecies.info/node/2456>), ainsi que par les contributions de l'IRD à l'Observatoire régional amazonien de l'OTCA et l'étude des stocks de biomasse par télédétection (en partenariat avec l'Institut de recherches scientifiques et techniques de l'État d'Amapá, IEPA, Brésil).

PARTENAIRES

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

Herbier de Guyane

Parc amazonien de Guyane

Office national des forêts (ONF),
Guyane française

Institut de recherches scientifiques
et techniques de l'État d'Amapá (IEPA),
Brésil

Institut de recherches scientifiques
et techniques de l'État d'Amapá (IEPA),
Brésil

Comment mesure-t-on la diversité forestière sur un aussi vaste territoire ?

L'un des moyens d'évaluer la biodiversité végétale consiste à compter ou à dénombrer les espèces présentes dans une communauté, généralement sur un petit espace. Les inventaires utilisent un échantillonnage quantitatif pour fournir initialement des informations sur la présence ou l'absence d'espèces dans des zones particulières. Le produit de ces études consiste en des listes d'espèces qui alimentent les collections biologiques de musées telles que celles du musée Emilio Goeldi (Pará) et l'herbier de Guyane française (CAY). Ce dernier a été créé et maintenu depuis 1960 par l'Orstom/IRD comme outil scientifique et patrimonial au service de la connaissance des espèces parfois menacées ou en voie de disparition.

Les inventaires dits « projets écologiques à long terme » (PELD), qui ont pour objectif principal l'étude de la structure, de la composition et la compréhension des processus écologiques, utilisent la mise en place et l'entretien de parcelles permanentes. Cette méthode est très coûteuse et nécessite une longue période pour la mise en œuvre, la collecte des données et l'entretien des parcelles.

Des inventaires rapides (*Rapid Assessment Program*, RAP) sont parfois réalisés pour évaluer la composition et le nombre d'espèces échantillonnées dans dix transects linéaires de 2×50 m, d'une superficie totale de 0,1 ha. Ces deux dernières méthodes sont courantes dans les études sur les communautés végétales.

Une autre approche de la recherche sur la biodiversité consiste à analyser la variabilité génétique des individus ou des populations d'espèces. La diversité génétique est la variété des allèles et des génotypes présents dans un groupe (populations, espèces ou groupes d'espèces). La diversité génétique est nécessaire pour que les populations puissent évoluer et faire face aux changements environnementaux.

Selon l'occupation des espèces, il existe des zones de succession primaire (lente occupation par une succession d'espèces végétales sur un substrat géologique initialement non occupé par la végétation) et secondaire (s'installe sur un substrat qui soutenait auparavant la végétation, mais qui connaît une perturbation écologique). Tout au long du processus de succession, la composition en espèces de la communauté change.

Le processus de succession secondaire maintient les communautés dans un état dynamique : les individus meurent et sont ensuite remplacés par d'autres. Le maintien de la grande diversité biologique présente dans la forêt est lié en partie à l'hétérogénéité environnementale et géographique (gradient de pluviosité par exemple), mais aussi à des processus locaux comme la compétition pour la lumière et l'eau ou la dispersion des graines par les animaux frugivores. Les écologistes et les forestiers étudient les clairières (appelées chablis lorsqu'elles sont créées par la chute naturelle d'un ou plusieurs arbres) car elles jouent un rôle important dans la régénération qui suit les perturbations. La compréhension des mécanismes de régénération et de la dynamique forestière permet, par exemple, de raisonner l'exploitation forestière.

Beaucoup d'études ont également tenté de déterminer des classes floristiques ou de classer les types de forêt présents dans le biome amazonien. La plupart du temps, les classifications forestières sont basées sur le climat, les types de sols et la physionomie ou l'apparence générale d'une forêt, incluant la hauteur, l'espacement, et la structure de ses espèces dominantes et, dans une certaine mesure, sur la composition floristique.

La biodiversité peut être quantifiée à l'aide de différentes méthodes. Les plus couramment utilisées sont la richesse (nombre d'espèces présentes dans une zone ou un habitat donné) et l'équité (l'équité reflète l'uniformité de la répartition de l'abondance entre les espèces d'une communauté) des espèces. Dans une communauté, l'abondance varie selon les espèces, certaines étant très abondantes (dominantes) et d'autres peu abondantes (rares) et extrêmement vulnérables aux changements. Les patrons d'abondance sont cependant susceptibles de varier d'une région d'Amazonie à une autre.

Mais pour donner une estimation de la diversité forestière à l'échelle du vaste bassin amazonien, d'autres méthodes sont nécessaires. Certains proxys – un proxy est une variable qui n'a pas forcément d'intérêt pour une question particulière, mais qui montre une corrélation avec une variable non ou difficilement mesurable – ont été utilisés, comme la précipitation totale annuelle, dont certaines études ont pu montrer une corrélation avec la diversité forestière. Des études statistiques permettent d'extrapoler la diversité à partir des très nombreuses analyses faites à l'échelle de la parcelle.

Que peut-on dire de la diversité de la forêt amazonienne ?

Une équipe internationale, à laquelle ont participé des chercheurs de l'IRD, a publié plusieurs travaux importants sur la diversité forestière amazonienne.

Une analyse a été menée, basée sur les 16 principales familles d'arbres. On compte au total 292 familles de plantes, dont 140 contiennent des espèces d'arbres. Sur ce nombre élevé, seules 16 familles représentent près de 80 % de tous les arbres qui atteignent 10 cm de diamètre à hauteur de poitrine (DHP). Cette analyse a permis de classer les types forestiers en quatre classes : les forêts sur sols latéritiques jaunes ou rouges, également appelées forêts de terre ferme ; les forêts de plaine inondable ; les forêts sur podzols ou sable blanc, qui sont des sols très appauvris ; et les forêts marécageuses.

Pour l'Amazonie, la quantité totale de précipitations annuelles ne semble pas être un bon proxy de la diversité locale. La variable la plus déterminante est la surface occupée par le type forestier. Plus la surface est grande et plus la diversité va être importante, plus l'espace est fragmenté et plus faible est la diversité, mais plus sera élevé le nombre d'espèces endémiques. Les forêts de terre ferme sont à cet égard les plus diverses, alors que les forêts de podzols contiennent un nombre important d'espèces endémiques.

Au travers de 530 025 collections rapportées pour l'Amazonie entre 1707 et 2015, la même équipe a répertorié un total de 11 676 espèces d'arbres, dans 1 225 genres et 140 familles.

L'extrapolation par une méthode de régression du nombre d'espèces collectées sur 1 170 parcelles réparties dans toute l'Amazonie et le bouclier guyanais

a estimé la diversité globale du biome amazonien à 16 000 espèces. Sur ces 16 000 espèces, 227 ont été qualifiées d'hyperdominantes, puisqu'elles représentent la moitié de tous les arbres d'Amazonie (1,4 % de la totalité des espèces), alors que les 11 000 espèces les plus rares ne représentent que 0,12 % du total des espèces. Une part significative de ces hyperdominantes appartiennent à trois familles, dont les palmiers.

En conclusion

Il existe encore beaucoup d'incertitudes et de discussions scientifiques sur le nombre d'espèces présentes en Amazonie. Le fait que 10 000 espèces d'arbres rares, peu connues et peu documentées, soient potentiellement menacées car elles occupent des espaces restreints et fragmentés est extrêmement préoccupant. La déforestation d'une très petite zone particulièrement diversifiée peut être catastrophique. Les récentes mises en évidence de la corrélation entre la perte de biodiversité et l'expansion des zoonoses et des pandémies viennent accroître cette préoccupation.

Dans ce scénario, la déforestation, la fragmentation de la forêt qui en découle et l'intensification des événements extrêmes tels que les sécheresses mettent en danger l'Amazonie que nous connaissons aujourd'hui.

Pour répondre à ces urgences, il s'avère essentiel que la science soit en mesure d'étudier la diversité des forêts avec le soutien des décideurs, de la société civile et des citoyens.



Palmier, forêt marécageuse amazonienne (igapó), Brésil.

Pour en savoir plus

MICHON S., CARRIÈRE M., MOIZO B. (éd.), 2019 – *Habiter la forêt tropicale au XXI^e siècle*. Marseille, IRD Éditions, 482 p.

TER STEEGE H. *et al.*, 2016 – The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports*, 6 (29549). 10.1038/srep29549.

TER STEEGE H. *et al.*, 2000 – An Analysis of the Floristic Composition and Diversity of Amazonian Forests Including Those of the Guiana Shield. *Journal of Tropical Ecology*, 16 (6) : 801-828.



Lianes des forêts marécageuses, Amazonie, Brésil.

Ont participé aux recherches

Raphaël Pélissier (IRD), Pierre Couteron (IRD), Piero Delprete (IRD), Julien Engel (IRD), Hubert de Foresta (IRD), Sophie Gonzales (IRD), Jean François Molino (IRD), Marie-Françoise Prevost (IRD), Christophe Proisy (IRD), Daniel Sabatier (IRD), Grégoire Vincent (IRD).

3

Le suivi de la déforestation et de la dégradation forestière

Les forêts tropicales, qui ont toujours été exploitées, font depuis plusieurs décennies l'objet d'une déforestation à grande échelle, stimulée par les perspectives de profit des activités agricoles extensives. Une prise de conscience au niveau international de l'importance de la conservation de la biodiversité appelle à leur préservation.

Contexte

L'Amazonie est particulièrement touchée par la déforestation, favorisée notamment par le développement de l'agriculture. Ainsi, l'Amazonie légale, qui s'étend sur plus de 5 millions de kilomètres carrés, a connu au cours des 40 dernières années une diminution de la surface forestière de plus de 10 000 km² par an, à l'exception d'une accalmie durant la période 2009-2015. Ce phénomène a des conséquences inquiétantes, que la recherche scientifique permet de caractériser et de projeter dans l'avenir, et que nous commençons à observer. Localement, la déforestation réduit l'habitat des animaux, favorise l'érosion des sols et les inondations le long des rivières, et accroît la précarité sociale qui prévaut sur les fronts pionniers. À une échelle plus globale, la déforestation de l'Amazonie réduit la biodiversité mondiale et accélère le réchauffement climatique.

Bien que partiellement planifiée, la colonisation de la forêt amazonienne a rapidement échappé à tout contrôle et un programme de surveillance a dû être envisagé. Compte tenu de l'immensité de la région à surveiller, l'observation de la Terre par satellite s'est avérée une solution incontournable dans les années 1980, notamment grâce au lancement du satellite Landsat-5, qui fournissait des images d'une résolution spatiale de 30 m et dont le rythme de deux observations par mois permettait d'espérer une image sans nuages au moins une fois par an. Au Brésil, l'Institut national de recherche spatiale (INPE) a reçu la mission de concevoir et de mettre en œuvre un programme de surveillance de l'Amazonie, en tenant compte à la fois de la réalité du phénomène géographique à observer et de ce qui était techniquement possible avec les missions spatiales et les outils de traitement disponibles.



Extension de la frontière agricole : déforestation, culture de riz pluvial et pâturages dans la région du Pará au Brésil.

Nous avons ensuite vu se développer deux grands axes de recherche, auxquels ont participé des chercheurs de l'IRD et du Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement).

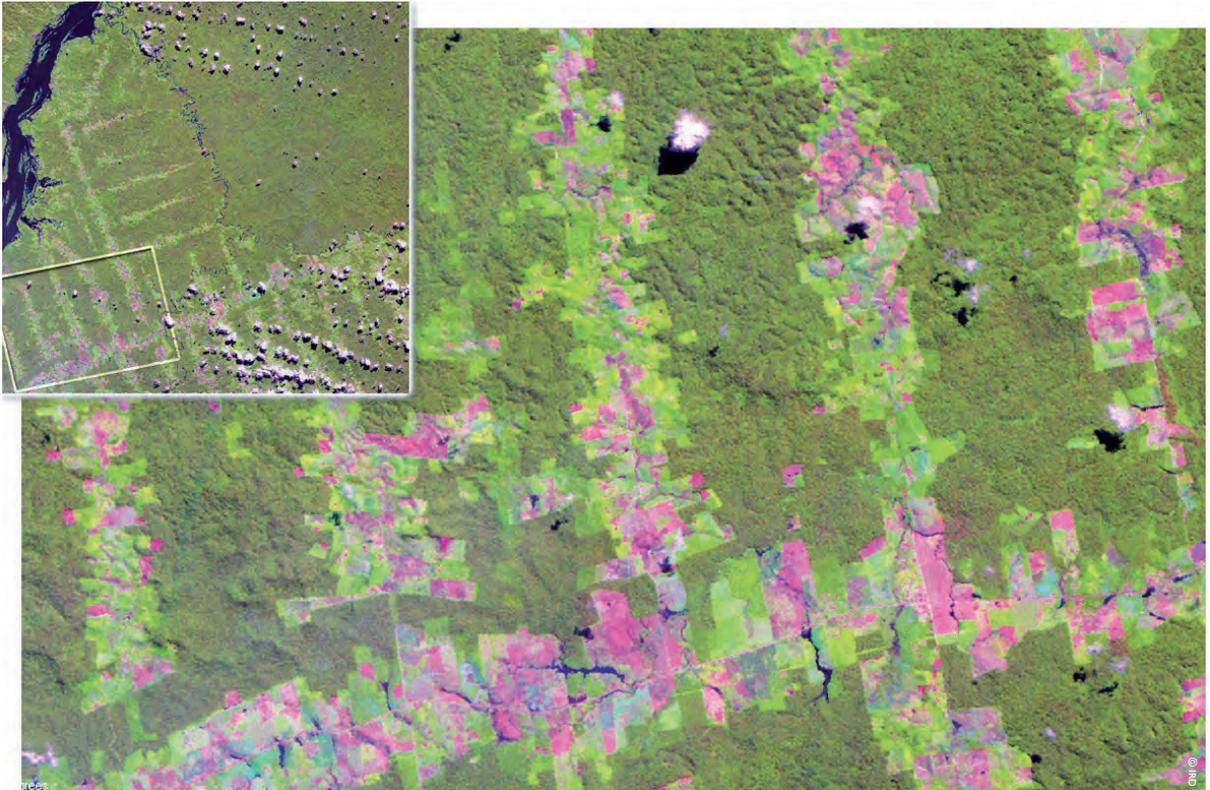
D'une part, les recherches en géographie et en sciences de l'environnement se sont concentrées sur le phénomène de déforestation, traceur spatial des migrations démographiques et des changements de l'économie agricole, en lien avec ses conséquences sur la société, sur l'épidémiologie des maladies tropicales, sur les écosystèmes terrestres et fluviaux et, de plus en plus, sur le climat. Cette recherche est particulièrement stimulée par la pression des grandes ONG et des programmes de recherche internationaux.

D'autre part, des recherches méthodologiques ont utilisé les technologies spatiales et les sciences informatiques (traitement d'images, statistiques, etc., évoluant vers une approche d'intelligence artificielle) pour le développement de méthodes de cartographie et de suivi des forêts tropicales par télédétection. Cela implique de dépasser les limites de la photo-interprétation traditionnelle, de rechercher un haut degré d'automatisation et de respecter les échelles spatiales et temporelles pertinentes. Cette recherche permet aux

PARTENAIRES

Institut national de recherches spatiales (INPE), Brésil

Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio), France



Structure et organisation des fronts pionniers.

agences spatiales qui conçoivent et financent les futurs satellites d'observation de la Terre de prendre en compte la nécessité de surveiller la déforestation en Amazonie.

Comment fait-on ?

La télédétection par satellite est essentielle pour la surveillance de l'Amazonie. Cependant, l'immensité de la région, qui conduit à l'acquisition de quantités gigantesques de données, nécessite que l'analyse des images, comme la détection des parcelles déboisées, soit assistée par ordinateur, voire automatisée, sans pour autant réduire la fiabilité de la détection.

Au départ, les méthodes traditionnelles développées dans le monde entier pour la télédétection des surfaces continentales ne prenaient en compte que les propriétés physiques des paysages observés et utilisaient des concepts tels que les signatures spectrales (images optiques) et les signatures polarimétriques (images radar). La connaissance du comportement spatial et temporel de la dégradation des forêts a permis de dépasser cette approche physique avec le développement de méthodes d'observation et d'algorithmes de traitement plus adéquats :

- la collaboration de différents systèmes spatiaux, complémentaires par leur résolution spatiale et par la périodicité de leurs observations, comme la collaboration de Landsat à moyenne résolution avec le capteur Modis à basse

résolution (250 m) et la revisite quotidienne (périodicité de passage du satellite en un même point de la surface du globe) ou l'utilisation de capteurs à très haute résolution (1 m) pour entraîner les algorithmes de classification d'images à moyenne résolution ;

– le développement d'indices spectraux adaptés à la détection de petites zones de déforestation dans les pixels où forêt et cultures sont mélangées, afin de surmonter la limite de résolution des capteurs disponibles ;

– la classification de l'utilisation des terres par une approche orientée objet qui, en plus de la réponse spectrale de chaque pixel indépendamment de ses voisins, prend en compte la texture du terrain, ainsi que la taille et la forme des parcelles à décrire, en les considérant comme des objets associés à des caractéristiques sémantiques.

– plus récemment, la multiplicité des mesures que la télédétection permet d'établir pour caractériser l'environnement ainsi que la gigantesque quantité de données disponibles ont rendu possible l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique, qui font partie des méthodes d'intelligence artificielle appliquées dans de nombreux domaines pour améliorer l'interprétation des images par une approche statistique puissante.

Parallèlement, des projets de recherche plus appliquée, axés sur l'évolution des systèmes agricoles dans les régions périphériques de l'Amazonie et utilisant des données de télédétection, ont permis de mieux comprendre les limites des méthodes de suivi et leur comportement dans des cas spécifiques, en fonction de la taille des parcelles déboisées, du relief, de l'humidité ou de la présence d'arbres maintenus sur pied ou abandonnés après l'abattage.

Dans tous ces développements, le capteur le plus utilisé a été Landsat TM (et son successeur OLI), qui a l'avantage d'offrir des caractéristiques instrumentales et orbitales inchangées depuis 40 ans, et dont la mission a été prolongée par le récent lancement du satellite Landsat-9. En plus de Landsat, la surveillance de l'Amazonie a bénéficié des données des satellites sino-brésiliens CBERS, qui ont des caractéristiques comparables à Landsat, pour augmenter la couverture de l'Amazonie, mais aussi d'autres systèmes d'observation tels que des capteurs optiques de résolution spatiale et de fréquence de revisite différentes, ou comme Sentinel-1 (radar à ouverture synthétique, insensible à la nébulosité). Il convient de noter que les méthodes de classification de l'occupation et de l'utilisation des sols n'atteignent jamais une précision de 100 %, en raison de la complexité et de l'hétérogénéité des paysages terrestres et des limites de la résolution et de la sensibilité des capteurs.

L'INPE contrôle constamment la qualité de ces produits et les résultats les plus récents indiquent une précision globale d'environ 94 % pour les données du programme de surveillance de la forêt amazonienne brésilienne par satellite (Prodes), et d'environ 93 % pour les alertes *Deforestation Detection System in Real Time* (Deter). Outre ce contrôle, la politique de transparence des données, adoptée par l'INPE depuis 2004, autorise le plein accès à toutes les données générées par les systèmes de surveillance, permettant ainsi des évaluations indépendantes par la communauté des utilisateurs, y compris le gouvernement dans ses différentes instances, le monde universitaire et la société dans son ensemble.

Quels sont les principaux résultats ?

Sur le plan scientifique, ces recherches ont donné lieu à de nombreuses publications, tant sur la méthodologie de cartographie et de suivi (potentiel et limites des capteurs ou des algorithmes, développement et validation de nouvelles méthodes) que sur le phénomène de la déforestation et ses impacts. En termes opérationnels, elles ont permis de développer des systèmes de suivi. Au Brésil, l'INPE produit et met à disposition trois niveaux d'information avec les systèmes Prodes, Deter et TerraClass, selon des approches cartographiques, de surveillance et d'analyse, respectivement, qui fournissent des informations avec des périodicités qui varient de quotidiennes à biennales.

Le système Prodes réalise chaque année l'inventaire de la perte de végétation primaire en utilisant des images optiques de moyenne résolution (10-30 m) telles que CBERS, Landsat, Sentinel-2. Pour l'Amazonie, une série historique ininterrompue contenant des données depuis 1988 est utilisée pour cartographier les zones de suppression de forêts de plus de 6,25 hectares. Cette surface minimale est respectée afin que la série historique, qui soutient les décisions et les négociations dans le domaine des politiques environnementales et climatiques pour l'Amazonie, soit cohérente et comparable dans le temps, ce qui nécessite le maintien de la surface minimale cartographiable pour garantir la cohérence temporelle des données. Les polygones cartographiés ayant une superficie comprise entre 1 et 6,24 hectares sont identifiés, mais ne sont pas pris en compte dans les taux de déforestation annuels. Pour les autres biomes brésiliens, les polygones dont la superficie est supérieure à 1 ha sont cartographiés et enregistrés. Il convient de noter que ces valeurs sont tout à fait suffisantes pour cartographier la suppression de la végétation indigène primaire, sinon, le polygone moyen de déforestation en Amazonie dans la période entre 2002 et 2015 était de 15,9 ha ; pour le Cerrado, dans l'intervalle entre 2013 et 2018, cette valeur moyenne était de 9,55 ha, ce qui montre que les données et les méthodologies utilisées dépassent les besoins.

Le système Deter, lancé en 2004, est un outil d'aide à la surveillance et au contrôle de la déforestation et de la dégradation en Amazonie et dans le Cerrado. Deter produit des alertes quotidiennes sur les altérations du couvert forestier pour les zones de plus de 3 ha. Les alertes indiquent pour l'Amazonie les zones totalement déboisées (coupes claires), ainsi que les zones en cours de dégradation forestière (exploitation forestière, exploitation minière, incendies et autres) et les zones avec suppression de la végétation primaire dans le Cerrado. Ces alertes sont automatiquement envoyées à l'Institut brésilien de l'environnement et des ressources naturelles renouvelables (Ibama) et à 20 autres institutions publiques liées au contrôle de la déforestation, afin de servir de base à la planification des mesures d'application. Les informations sont également disponibles sur Internet pour l'ensemble de la société avec des mises à jour hebdomadaires des données. Pour la cartographie des polygones Deter, des images WFI sont utilisées, à bord des satellites CBERS4, CBERS4A et Amazônia-1. Ces images ont une résolution spatiale de 60 m, et l'utilisation d'images de constellations permet de revisiter le même point entre

un et deux jours. La capacité de Deter à générer des alertes à destination des organismes chargés de l'application de la loi dépasse largement sa capacité à mener des actions de terrain, puisque depuis août 2015, plus de 190 000 alertes de déforestation et plus de 86 000 alertes de dégradation des forêts ont été émises pour l'Amazonie et, depuis mai 2018, plus de 56 000 alertes de suppression de la végétation ont été émises pour le Cerrado.

En complément de Deter, pour les zones présentant la plus forte concentration d'occurrences de déforestation en Amazonie, un ensemble de zones d'environ 700 000 km² ont été définies, dans lesquelles un suivi avec une fréquence de revisite plus élevée et avec des images de plus haute résolution spatiale est effectué, appelé Deter Intense. Ce système de surveillance plus localisé fait un usage plus opportuniste des images disponibles, même hétérogènes, permettant une revisite quasi quotidienne afin de produire des alertes précoces.

Outre la surveillance de la suppression et de la dégradation de la végétation primaire, l'INPE, en partenariat avec la société brésilienne de recherche agricole Embrapa, a également surveillé l'utilisation et la couverture des sols dans les parties de l'Amazonie et du Cerrado où la végétation primaire a été supprimée. Ce suivi est assuré par le projet TerraClass (système de cartographie de l'occupation et de l'utilisation des sols après déforestation), qui est réalisé tous les deux ans pour les surfaces supérieures à 6,25 ha. Les résultats de TerraClass permettent d'évaluer l'utilisation et l'occupation dynamiques de ces zones dans les classes cartographiées par le projet (agriculture, pâturages, régénération et autres).

Quel est l'apport de l'IRD ?

Les équipes de recherche de l'IRD s'intéressent depuis longtemps au sujet de la déforestation de l'Amazonie, notamment au Brésil, et aux questions liées aux causes et aux conséquences de ce phénomène. Le laboratoire Espace Dev de Montpellier, par exemple, suit une approche interdisciplinaire du paysage amazonien, de l'hydrologie à l'épidémiologie des maladies vectorielles, qui contribue à la compréhension de la dynamique du phénomène de déforestation et exploite au mieux les données de télédétection. Les laboratoires de l'OMP de Toulouse ont une approche liée au concept d'observatoire de l'environnement, basée sur des séries de données qui sont produites et analysées en fonction d'un questionnement scientifique. Dans le cas de la déforestation, nous citons les travaux du Cesbio, qui développe des algorithmes de détection satellitaire de la déforestation, et indirectement, ceux du Geosciences Environnement Toulouse (GET), qui étudie le transport des sédiments dans les rivières, traceurs de la déforestation visibles depuis l'espace.

Quels défis pour l'avenir ?

Les défis suscités par l'étude et le suivi de la déforestation en Amazonie, alimentés par des difficultés aussi variées que la couverture nuageuse et les controverses médiatiques, sont de nature scientifique, technologique et politique.



Avancée du soja et déforestation, Brésil.

Du point de vue de l'information, les systèmes existants d'observation de la Terre, de plus en plus nombreux en orbite, permettent d'augmenter significativement la résolution spatiale et la fréquence de revisite, fournissant une alerte précoce dans les petites parcelles déboisées. Les principaux défis sont alors liés au volume des données, qui nécessite des méthodes de stockage, de transmission et de traitement plus adéquates. Les traitements doivent exploiter davantage la synergie entre les différents systèmes (les limites de l'un étant compensées par la sensibilité de l'autre) et prendre en compte les connaissances disponibles sur le phénomène de la déforestation, notamment ses causes et son comportement spatio-temporel, afin de concentrer la surveillance sur les zones où une nouvelle déforestation est la plus probable. De toute évidence, la rigueur de la validation des résultats, la traçabilité des chaînes de production et la transparence des informations sont essentielles pour un sujet à controverse.

Cependant, l'observation de la déforestation ne suffit pas à ralentir le phénomène, tout comme un thermomètre ne fait pas baisser la fièvre d'un malade. Les efforts de recherche et d'ingénierie visant à comprendre et à surveiller la dégradation de la forêt amazonienne doivent être soutenus par l'ensemble de la société, y compris les décideurs publics et privés, afin de trouver la voie du développement de la région parallèlement à la lutte contre la déforestation.

Pour en savoir plus

MICHON S., CARRIÈRE M., MOIZO B. (éd.), 2019 – *Habiter la forêt tropicale au XXI^e siècle*. Marseille, IRD Éditions, 482 p.

DOBLAS J. *et al.*, 2020 – Optimizing Near Real-Time Detection of Deforestation on Tropical Rainforests Using Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12, 3922. doi :10.3390/rs12233922.

LE TOAN T. *et al.*, 2017 – Monitoring of tropical forests using SAR data. Application to the Amazon region. *18^o Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, Annales INPE : 8076-8083.

SOLER L. *et al.*, 2021 – Promising advances of Amazonian monitoring systems throughout vanguard technology and scientific knowledge. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII (B3), 843-849. 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-843-2021.

Ont participé aux recherches

Laurent Polidori (UFPA/Cesbio), Claudio Almeida (INPE), Luis Eduardo Pinheiro Maurano (INPE), Luciana Soler (INPE), Marcus Adami (INPE), Juan Doblás (INPE), Stéphane Mermoz (Cesbio), Alexandre Bouvet (Cesbio).

4

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

À la suite des recherches initiales sur la compréhension de la genèse des sols tropicaux sont nés différents programmes sur l'évolution des sols après déforestation, sur les effets du brûlis et de la mise en culture sur le cycle du carbone et sur la biodiversité, sur l'activité faunique et microbienne du sol, leur finalité étant de contribuer à définir des pratiques adaptées de gestion des milieux tropicaux. Cette évolution des recherches sur les sols en Amazonie a accompagné une prise de conscience globale sur l'importance de ces derniers pour la sécurité alimentaire et comme support de la biodiversité, et sur les risques que fait peser leur dégradation sur plusieurs services écosystémiques

Contexte

La coopération entre l'Orstom/IRD et le Brésil en sciences du sol a commencé en 1971 dans l'État de Bahia, dans le but de développer des études conjointes sur la genèse des sols tropicaux et le devenir de la matière organique.

L'investissement réalisé dans la diffusion des connaissances sur l'analyse structurale de la couverture pédologique au Brésil par l'IRD a conduit au XXI^e congrès brésilien de la science du sol, qui s'est tenu à Campinas, São Paulo, en 1987, sur le thème de la responsabilité sociale de la science du sol.

Il a été très vite reconnu que les sols latéritiques étaient caractéristiques des régions tropicales. Leur large répartition dans ces régions a été attribuée dès les années 1960 à la grande quantité de précipitations tombant dans une période chaude, à la température élevée dans le sol tout au long de l'année



Les services hydriques du sol sont très affectés par les pâturages. Front pionnier amazonien, État du Pará, Brésil.

et au faible ruissellement sous forêt favorisant l'infiltration d'une proportion importante de la précipitation, à une certaine stabilité tectonique (boucliers anciens) et à une stabilité climatique au cours des temps géologiques. Ces caractéristiques climatiques favorisent une dégradation rapide de la grande quantité de matière organique déposée à la surface du sol, l'infiltration massive permet une altération profonde et la relative stabilité tectonique favorise le développement de sols anciens. Cette altération, qui se développe sur de grandes profondeurs, est caractérisée par un lessivage de la silice et par une accumulation des oxydes de fer libérés, ce qui leur donne leur couleur caractéristique rouge ou jaune suivant les oxydes de fer dominants. Ce lessivage de la silice combiné à l'accumulation d'oxydes de fer fait que ces sols sont composés d'argiles caractéristiques de leur mode de formation, qui donnent aux sols latéritiques une structure favorisant le drainage tout en étant très résistante, pour peu que le sol ne soit pas perturbé en profondeur. Les sols latéritiques sont donc des sols très anciens, épais, caractérisés par une structure très particulière en « poudre de café », majoritairement rouge ou jaune. La façon dont l'eau circule dans le sol a un impact majeur sur la différenciation de ces sols, selon qu'elle s'infiltré verticalement, qu'une partie de l'eau infiltrée ait la possibilité de migrer latéralement à l'intérieur du sol,

PARTENAIRES

Institut national de recherche en Amazonie (INPA), Brésil

Université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra), Brésil

Université fédérale du Pará (UFPA), Brésil

Centre de l'énergie nucléaire dans l'agriculture (Cena), Brésil

Université de São Paulo (USP), Brésil

Université de l'État de São Paulo (UNESP), Brésil

Université d'État de Londrina (UEL), Brésil



Coupe de route dans les latérites sur la BR 174 entre Boa Vista et Caracaraí, Brésil.

ou qu'elle s'accumule dans le sol pendant une période plus ou moins longue, permettant soit le lessivage complet de la matière organique et des oxydes de fer et donnant lieu à un autre type de sol caractéristique, le podzol (dans les conditions acides et réductrices favorisant la mise en solution des oxydes de fer), soit à une réduction de l'oxygène présent dans le sol donnant les traits caractéristiques des sols hydromorphes. À ces caractéristiques générales correspond le fait que, d'une part, ces sols deviennent compacts dès que leur structure particulière est perturbée et que, d'autre part, leur fertilité faible due à leur basse teneur en matière organique implique que tout défrichage de la forêt ou mise en culture les transforme irrémédiablement en sols profondément dégradés. Les sols de la région intertropicale sont donc en règle générale des sols très stables en milieu naturel, et extrêmement fragiles aux perturbations.

L'Orstom/IRD a joué un rôle majeur dans la compréhension des mécanismes de genèse et de transformation des sols tropicaux, d'abord en Afrique centrale et occidentale, puis en Guyane et au Brésil. Une branche de la pédologie française a connu un développement important en Guyane et au Brésil : la pédologie structurale. Celle-ci s'intéresse à la transformation des sols qui s'opère comme nous l'avons vu plus haut suivant les différents schémas de circulation de l'eau dans le sol, ces différents types de circulation étant fonction de la topographie. Les pertes de matières dues à la dégradation des latérites influent à leur tour sur le modelé. Ces évolutions des sols latéritiques sous l'influence des facteurs du milieu font de la couverture pédologique un ensemble vivant, se transformant et modifiant le relief, en donnant ainsi à lire dans le paysage le stade d'évolution de ces couvertures. Cette méthode d'analyse des transformations des sols et des paysages a fait l'objet du grand programme Dynamiques des latérites (Dylat), qui s'est déployé d'abord en Afrique centrale, puis en Guyane dans les années 1990 et enfin au Brésil dès 1995.

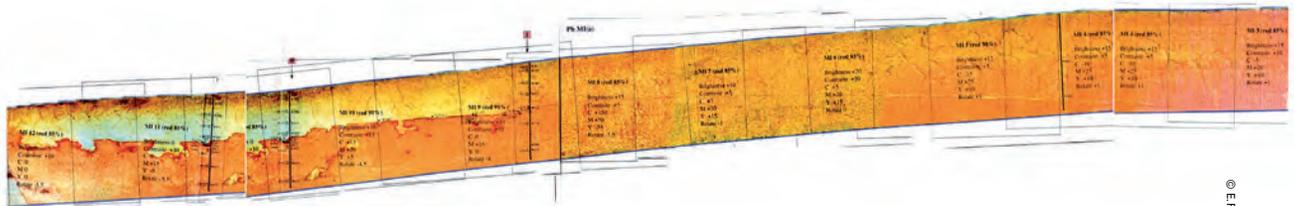
De ces programmes initiaux sur la connaissance de la genèse des sols sont nés différents programmes sur l'évolution des sols après déforestation, sur les effets du brûlis et de la mise en culture sur le cycle du carbone et sur la biodiversité, sur l'activité faunique et microbienne du sol. Il s'agissait de mieux comprendre les relations entre la biodiversité épigée (végétation), la biodiversité endogée (faune et microflore), et les composantes physiques, chimiques et biologiques du fonctionnement du sol. La finalité de la recherche étant de contribuer à définir des pratiques de gestion des milieux tropicaux adaptées à leurs contraintes et potentialités.

Cette évolution des recherches sur les sols en Amazonie a accompagné une prise de conscience globale sur l'importance des sols pour la sécurité alimentaire et comme support de la biodiversité, et sur les risques que fait peser la dégradation des sols sur plusieurs services écosystémiques (les bénéfices que les sociétés humaines tirent des écosystèmes naturels ou affectés à des degrés variés par les activités anthropiques). Étroitement liés à la biodiversité, les services écosystémiques se réfèrent à des processus écologiques qui se déploient de l'échelle microscopique jusqu'à celle de la planète. Les services écosystémiques abordés dans ce projet étaient la régulation du climat, à travers la séquestration du carbone dans le sol et la végétation, la régulation du cycle de l'eau et le contrôle de l'érosion du sol, enfin la fourniture de produits sylvicoles et agricoles.

Dans l'agenda international, cette prise de conscience s'est traduite par l'inclusion dans les Objectifs de développement durable (ODD) du concept de neutralité en matière de dégradation des terres, puis des discussions autour du nexus sécurité alimentaire/action climatique/dégradation des terres (ODD 2, 13 et 15).

Comment sont étudiés les sols en Amazonie ?

Pour l'analyse structurale des sols, l'étude de toposéquences (ou profils de sols alignés selon le gradient topographique) continues est privilégiée, le long d'une tranchée ouverte qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres de longueur sur plusieurs mètres de profondeur. À défaut, plusieurs profils sont étudiés selon le gradient topographique. Dans ces tranchées ou ces profils, une description très fine des traits morphologiques est réalisée, accompagnée de prélèvements dans les morphologies représentatives qui sont utilisés pour analyser et décrire la couleur, la texture, la structure, la composition chimique ainsi que cristallographique (nature des argiles et des hydroxydes de fer).



Toposéquence dans les latérites de la région d'Humaita.

Les travaux ont fait appel à des approches pétrographiques, minéralogiques et géochimiques permettant d'appréhender la nature et la distribution relative des composantes des couvertures d'altération, depuis l'échelle d'unités de paysages représentatives des surfaces continentales de ce bassin jusqu'à celle de leurs constituants élémentaires. L'originalité des travaux engagés réside de ce fait dans la complémentarité des démarches utilisées, elles-mêmes adaptées à un emboîtement naturel de structures.

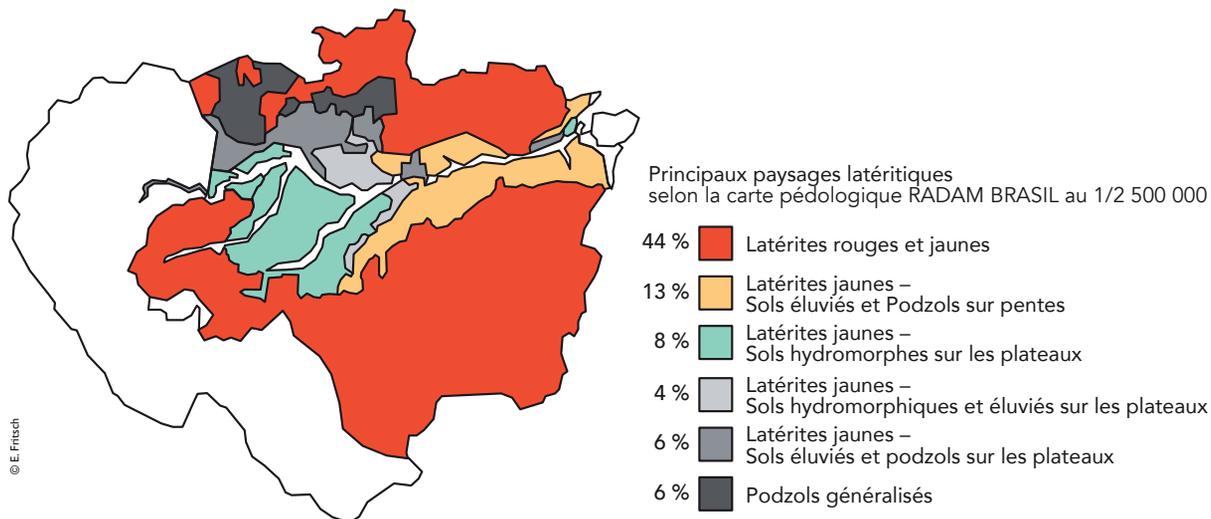
Pour étudier les relations entre les caractéristiques du sol et les facteurs du milieu (par exemple pour déterminer le rôle de la déforestation sur la diminution de la biomasse racinaire), un grand nombre de situations sont étudiées, distribuées dans les différents types de couverture du sol (depuis la forêt préservée jusqu'aux pâturages et cultures, en passant par les forêts exploitées). Dans les sites étudiés sont prélevés des échantillons de sols pour analyser toutes leurs caractéristiques. Des matrices de données ont été produites, comprenant les teneurs en carbone dans le sol et la biomasse végétale, l'agrégation et d'autres propriétés physiques, hydriques et chimiques du sol, avec deux objectifs : d'une part, évaluer des indicateurs pertinents des services écosystémiques ; d'autre part, décrire les relations statistiques entre la composition et la structure du paysage, la biodiversité, les productions et les services écosystémiques, au niveau de l'exploitation agricole ou de la parcelle. Une quarantaine de variables ont été mesurées dans tous les points du dispositif afin de caractériser l'un des services écosystémiques, voire plusieurs : par exemple, la connaissance de la densité apparente du sol est nécessaire au calcul du stock de carbone du sol ; elle est aussi l'une des variables retenues pour évaluer le sous-indicateur de qualité physique du sol ; elle intervient enfin dans le calcul des réservoirs d'eau dans le sol. Quand tous les résultats sont réunis, des analyses statistiques sont menées pour déterminer si des corrélations entre les variables d'intérêt existent et sont significatives.

Dans l'étude de la matière organique du sol et de sa dynamique, une place importante était faite à la répartition des constituants organiques au sein de fractions séparées par des méthodes normalisées. L'analyse isotopique en abondance naturelle (^{13}C , ^{15}N) ou en enrichissement (^{14}C , ^{15}N) a été privilégiée, en association avec des approches expérimentales et de terrain (décomposition des résidus de plantes, collecte périodique de gaz carbonique dégagé par le sol, etc.).

Ces différentes études nécessitent des démarches de longue durée, avec une présence de plusieurs mois sur le même terrain.

Quels sont les résultats marquants sur les sols d'Amazonie et quelles sont les perspectives ?

Les travaux portant sur la dynamique des latérites et les processus d'altération ont amené à proposer un modèle géochimique global, qui retrace les stades successifs de la formation puis de la transformation des formations latéritiques dans un environnement tropical où les apports pluviométriques et les excès d'eau dans les sols et les sédiments sont localement très importants. Le modèle oppose un milieu bien drainé (formations latéritiques *stricto sensu*), prédominant à la périphérie de ce bassin, à un milieu moins bien drainé,

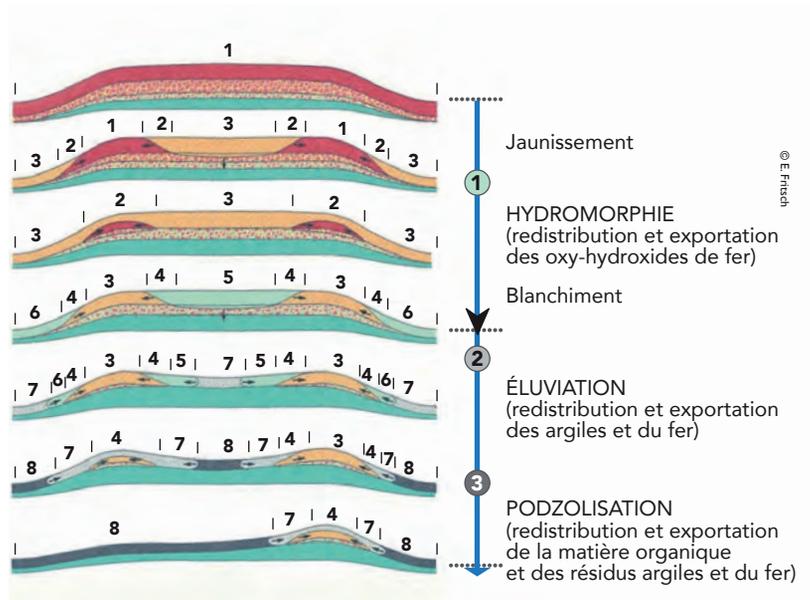


La répartition des grandes associations de sol au niveau du bassin amazonien brésilien.

périodiquement ou constamment engorgé (formations hydromorphes), qui devient majoritaire dans la partie centrale, et surtout dans la partie amont et plus pluvieuse de ce bassin.

Alors que la plupart des études sur la pédogénèse des sols ferrallitiques ont pris place essentiellement dans l'État d'Amazonas dans des zones de forêt préservée, les études associant les fonctions et constituants du sol aux stocks de carbone et à la biodiversité concernent les États du Rondônia, du Maranhão et surtout du Pará, sur l'arc de déforestation.

L'intervention de l'homme provoque, au niveau du sol, des changements qui affectent en premier lieu le système poral, lequel détermine à la fois tous les transferts d'eau, d'éléments en solution et de gaz, et par voie de conséquence l'activité biologique et l'ensemble du fonctionnement. La mise en culture entraîne des déséquilibres dans les populations animales et dans la biomasse microbienne des sols, qui ont pour conséquence la disparition de certains groupes. Des perturbations très fortes du fonctionnement du système pédologique sont observées, système qui évolue alors vers de nouveaux états, les plus satisfaisants étant ceux qui se rapprochent du système forestier initial. Les pâturages qui suivent la déforestation ne peuvent maintenir leur pérennité, dans les conditions de gestion propres aux *fazendas* (fermes), au-delà de 6 à 8 ans en Amazonie centrale. On peut considérer que le système fonctionne de nouveau bien lorsqu'il est capable de recycler de manière permanente, comme le fait la forêt primitive, la quasi-totalité des apports (litière et fertilisants) qui sont alors repris par la production primaire. Alors que, jusqu'à maintenant, l'accent avait été mis sur la pauvreté chimique des sols amazoniens, il a été montré que les techniques de récupération des sols dégradés doivent viser, en priorité, au maintien des bonnes propriétés physiques du sol. Les moyens biologiques tels que l'emploi de légumineuses à enracinement colonisateur et la prolifération de vers de terre semblent constituer des aides efficaces pour reconstituer le milieu après défrichage.



L'évolution du modelé en lien avec l'évolution des latérites.

Parmi les services écosystémiques abordés, le stockage de carbone dans le sol est le moins affecté par le changement d'usage du sol. Cependant, même en cas de séquestration de carbone dans le sol, cela ne permet jamais de compenser notablement l'importante réduction du stock de carbone dans la biomasse ligneuse. Les services hydriques du sol, particulièrement le processus d'infiltration de l'eau, mais aussi le stockage de l'eau bio-disponible, sont très affectés dans les pâturages. Une telle évolution peut devenir une contrainte pour la production, tout en augmentant fortement le risque d'érosion. Les mesures sous végétation secondaire attestent cependant d'une réversibilité des changements de propriétés physiques et hydrodynamiques qui se produisent dans les pâturages. Un modèle d'explication des liens entre fonctionnement des sols et biodiversité reste à construire, afin d'imaginer les solutions agroécologiques qui permettraient de sauvegarder cette fonction essentielle.

Une autre évolution des recherches en Amazonie se fait jour au travers de l'évolution des recherches en sciences du sol. Alors qu'elle a pris dans ses débuts la forme d'études académiques faisant peu de place aux savoirs locaux, la recherche a évolué vers la compréhension des mécanismes qui permettent le respect des fonctions écologiques du sol, en prenant en compte la place centrale des pratiques agroécologiques traditionnelles.

En conclusion

L'application du concept de couverture pédologique continue dans le paysage, au lieu de collections de sols séparés, ainsi que l'utilisation pratique de ce concept dans des toposéquences représentatives contribuent à la réalisation de diagnostics qui servent de pont pour le dialogue entre les chercheurs, les agents de vulgarisation et les groupes d'agriculteurs installés

sur de petites parcelles dans des localités, des communautés, des établissements ruraux et des réserves agro-extractivistes, entre autres. Un exemple de cette application existe depuis un certain temps dans l'État du Pará, et se trouve actuellement intégré au programme du cours de licence en développement rural de l'université fédérale du Pará.

Pour en savoir plus

BARROS E. *et al.*, 2004 – The relationship between soil physical degradation and changes in macrofaunal communities of an Amazonian pasture. *Applied Soil Ecology*, 26 : 157-168. DOI : 10.1016/j.apsoil.2003.10.012

CHAUVEL A. *et al.*, 1999 – Pasture damage by an Amazonian earthworm. *Nature*, 398 : 32-33.

FRITSCH E. *et al.*, 2002 – Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. *European Journal of Soil Science*, 53 : 203-217.

GRIMALDI M. *et al.*, 2014 – Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. *Landscape Ecology*, 29 : 311-328. DOI : 10.1007/s10980-013-9981-y

MARTINS P. F. S. *et al.*, 1991 – Consequences of clearing and tillage on the soil of a natural Amazonian ecosystem. *Forest, Ecology and Management*, 38 : 273-282.

Ont participé aux recherches

Thierry Desjardins (IRD), Paulo Martins (université fédérale du Pará), Frédérique Seyler (IRD), Boris Volkoff (IRD), Armand Chauvel (IRD), Jean Delvigne (IRD), François Soubiès (IRD), Max Sarrazin (IRD), René Boulet (IRD), Yves Lucas (IRD), Michel Grimaldi (IRD), Martial Bernoux (IRD), Christian Feller (IRD), Francis Andreux (CNRS, détaché), Thérèse Choné (CNRS, détaché), Emmanuel Fritsch (IRD), Étienne Balan (IRD), Philippe Magat (IRD), Corinne Rouland (IRD), Patrick Lavelle (Sorbonne Université), Michel Brossard (IRD), Éric Blanchart (IRD), Sophie Cornu (Inra), Carlos C. Cerri (Cena-USP), Carlos E. Cerri (Cena-USP), Brigitte Feigl (Cena-USP), Reynaldo Victoria (Cena-USP), Jenner de Moraes (Cena-USP), Adolpho Melfi (USP), Nadia do Nascimento (université d'État Paulista Júlio de Mesquita Filho), Eichi Matsui (USP), Flavio Luizão (INPA), Regina Luizão (INPA), Eleusa Barros (INPA), Arnaldo Carneiro (INPA), Fatima Guimarães (université d'État de Londrina), João Ferraz (INPA), Mario da Silva Jr. (Ufra), Vania Melo (université fédérale du Césara, UFC).

5

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

Le bassin amazonien regroupe une mosaïque de plus de 6 500 lacs, de forêts inondées, de chenaux interconnectés en permanence ou de manière saisonnière, qui jouent un rôle majeur dans le bilan d'eau et de sédiments du fleuve en stockant eau et matière pendant les hautes eaux et en les relâchant dans le fleuve pendant les basses eaux. Leur étude est également essentielle pour comprendre leur rôle sur le bilan régional des gaz à effet de serre. Ces zones de très forte productivité sont un lieu de vie et de pêche pour de nombreux riverains.

Contexte

Le 25 juin 1999, un petit avion à hélice survole la plaine d'inondation de l'Amazone dans la région d'Óbidos. À son bord, deux chercheurs de l'IRD sont à la recherche d'un site d'étude pour comprendre pourquoi des millions de tonnes de sédiments manquent au bilan des exportations sédimentaires de l'Amazone. En effet, depuis déjà plusieurs années, la quantité de sédiments transportée par l'Amazone et tous ses grands affluents est mesurée très régulièrement dans le cadre de l'observatoire HyBAm. On a ainsi constaté que la quantité de sédiments mesurée à Óbidos, la dernière station de mesure de l'Amazone avant son embouchure à l'océan Atlantique, est inférieure à la somme de ces flux sédimentaires. De plus, certains éléments chimiques (tels que le fer, le manganèse, l'arsenic) n'ont pas la même forme biochimique en amont et en aval de ces zones d'inondation.

Plus de 6 500 lacs de formes et dimensions variées ont été identifiés le long de l'Amazone. Ils couvrent une superficie estimée entre 300 000 et 800 000 km², soit jusqu'à 20 % de la surface du bassin. Celui-ci regroupe une mosaïque de lacs, de forêts inondées, de chenaux interconnectés en



Barque de pêcheur submergée, Lago Grande de Curuaí, Brésil.

permanence ou de manière saisonnière. Au Brésil, on utilise pour désigner ces lacs le terme de *várzea*. Ce sont des plaines d'inondation enrichies en sédiments et propices à l'agriculture et à l'élevage quand elles s'assèchent lors des basses eaux. En langue tupi-guarani, le terme signifie « là où il y a de l'eau ». Le choix de la zone d'étude s'est finalement porté sur la plaine d'inondation appelée « *várzea* do Lago Grande de Curuaí », l'une des plus étendue de l'aval du bassin amazonien et située dans l'État du Pará, entre la ville d'Óbidos et la ville de Santarém, en rive droite de l'Amazone. Plusieurs chenaux la connectent avec l'Amazone, mais seul celui situé le plus en aval est permanent et peut fonctionner comme une entrée ou une sortie d'eau selon la différence de niveau d'eau entre l'Amazone et la *várzea*. Celle-ci est composée de différents plans d'eau temporairement interconnectés présentant des couleurs et des qualités d'eau différentes, notamment en termes de turbidité et de production biologique (pigments chlorophylliens). La surface inondée varie de façon linéaire par rapport à la hauteur d'eau dans l'Amazone, entre 500 km² et 2 500 km² pour un niveau d'eau variant entre 3 et 11,5 m à l'échelle hydrométrique d'Óbidos. Sur sa berge sud, elle reçoit

PARTENAIRES

Université fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ), Brésil

Université fédérale de Rio Grande do Sul (UFRGS), Brésil

Université fédérale d'Amazonas (Ufam), Brésil

Université d'État d'Amazonas (UEA), Brésil



La várzea Lago Grande de Curuai
vue d'avion.

des apports de plusieurs petites rivières (*igarapés*), qui drainent une superficie totale d'environ 1 400 km². La couverture végétale se distribue dans la zone inondable entre forêt alluviale et prairies temporaires, et sur la terre ferme jamais inondée, entre forêt primaire, secondaire, pâturages et zones de culture. Cette várzea est donc étudiée depuis une vingtaine d'années pour comprendre et quantifier son impact sur l'évolution de la composition de l'eau, des sédiments, des éléments chimiques qui entrent dans cette mosaïque de lacs d'eau noire ou blanche (plutôt marron clair en réalité), certains éléments s'y déposant, d'autres rejoignant le cours d'eau principal de l'Amazone après avoir été transformés par des processus chimiques et biologiques complexes. La várzea est un milieu très dynamique, avec une végétation qui naît à chaque période de basses eaux et meurt à chaque saison d'inondation. Nous avons donc également cherché à comprendre et à mesurer son impact sur le bilan de carbone apporté par l'Amazone à l'océan Atlantique, et par extension sur celui des gaz à effet de serre vers l'atmosphère.

Comment fait-on ?

Pour ce faire, nous avons mis en place un réseau permanent d'une demi-douzaine de stations de mesures (leur nombre a varié au cours du temps), surveillées par des observateurs recrutés parmi les habitants de la várzea. À chaque point de ce réseau, l'observateur mesure chaque jour la hauteur d'eau, prélève tous les dix jours un échantillon d'eau qui sera ensuite analysé au laboratoire à Brasilia pour mesurer la quantité de matières en suspension, et chaque mois un autre prélèvement d'eau est effectué pour l'analyse chimique des cations majeurs. Un cation est un atome ou une molécule qui a perdu une ou plusieurs charges électriques ou électrons, devenant de ce fait chargé positivement. On dit qu'il est majeur si cet élément se trouve en quantité relativement importante (concentration de plus de 1 mg.l⁻¹), en comparaison aux éléments traces qui se trouvent en quantité infime dans l'environnement (concentration de quelques µg.l⁻¹). Pour compléter ce réseau, nous organisons des campagnes avec nos collègues de nombreuses universités (voir encadré partenaires) deux fois par an, en basses eaux et en hautes eaux, pour mesurer les débits dans les différents chenaux, effectuer d'autres prélèvements, cette fois pour l'analyse de données biogéochimiques plus complètes et plus complexes (éléments majeurs et en trace, carbone organique dissous et particulaire, chlorophylle-a, traceurs isotopiques). Les conditions physico-chimiques sont également mesurées à l'aide de sondes (pH, conductivité). Le réseau de mesures ainsi que les nombreuses campagnes de terrain (une douzaine entre 1997 et 2004) ont permis d'établir une base de données exceptionnelle sur une zone d'inondation en région tropicale et d'élaborer une modélisation permettant de comprendre les variations saisonnières et interannuelles du bilan hydrologique : flux échangés et sources d'eau, bilan sédimentaire, bilan de carbone dissous et particulaire et d'un certain nombre d'éléments chimiques majeurs et traces.

Le modèle hydrologique et sédimentaire calé sur les mesures réalisées pendant plusieurs années nous a permis de représenter l'évolution temporelle de la várzea en termes de source, de stock et de mélange d'eau et d'éléments chimiques, et de déterminer l'impact des várzeas sur les flux échangés avec l'Amazone.

Pendant un cycle hydrologique, nous observons une phase de remplissage de la plaine de novembre à fin mai et une phase de vidange de début juin à novembre, avec un temps de résidence variant de 3 à 5 mois. Sur la période étudiée (1997-2003), la surface varie en moyenne d'un facteur 3 entre la période de basses eaux en novembre et la période de hautes eaux en juin. La période de stockage, pendant laquelle les volumes d'eau importés dans la plaine sont supérieurs à ceux exportés, débute entre décembre et février selon les années et dure jusqu'en juin. À partir de ce mois, et jusqu'à la fin de chaque cycle, la plaine exporte vers le cours principal plus d'eau qu'elle n'en reçoit, le maximum d'exportation ayant lieu en août et septembre en général.

Les écoulements dans les plaines d'inondation étant plus lents que dans le fleuve, ces zones sont des sites privilégiés de piégeage des sédiments. Le flux particulaire qui entre dans la várzea varie relativement peu (de l'ordre de $1,5 \cdot 10^6$ t \pm 9 % de sédiments entrants). Le piégeage de sédiments en suspension est estimé en moyenne entre 41 % et 53 % du flux entrant (environ 800 000 t par an), variable d'une année à l'autre suivant la rapidité de montée de la crue et de son intensité. Plus la crue est lente ou faible, plus le piégeage est réduit sous l'influence de processus de remise en suspension qui favorisent l'exportation de matériel.

En plus de leur influence sur l'hydrologie et le transport sédimentaire, les plaines d'inondation ont un impact important sur la biogéochimie et l'écologie du bassin amazonien. Si on compare les concentrations en calcium et potassium mesurées *in situ* et celles prévues par le modèle hydrologique, on constate une différence qui montre un stockage de ces éléments pendant la période de montée des eaux et un déstockage pendant la vidange. Ce cycle stockage/déstockage de certains éléments chimiques est en grande partie lié à l'influence des plantes semi-aquatiques (les jacinthes d'eau par exemple) capables de prélever les nutriments directement de l'eau. En période de vidange, la dégradation de ces plantes conduit au déstockage de ces éléments. À l'échelle annuelle, le flux sortant de calcium (Ca) et de potassium (K) représente entre 10 % et 30 % du flux entrant. Le manganèse (Mn) et le Fer (Fe) sont clairement piégés dans les sédiments de la várzea, le stockage représentant respectivement 47 % et 97 % du flux entrant.

Les várzeas sont des systèmes très riches en biodiversité et très productifs. La production primaire (production de biomasse algues, bactéries, plancton) dans les várzeas est estimée à 110 t de poids sec par hectare et par an (comparé aux 10 à 20 t/ha/an d'une forêt de climat tempéré). Cette productivité est due à la fertilité des sédiments des lacs enrichis en éléments majeurs apportés par le fleuve, indispensables au développement du phytoplancton et des espèces végétales. De ce fait, les várzeas interfèrent significativement sur le transfert de carbone dans le bassin amazonien et *in fine* vers l'océan Atlantique, à la fois sur le type de matière organique et sur les flux. Nous avons montré, grâce aux mesures de carbone 14 , que la matière organique qui entre dans la várzea pendant la montée des eaux est celle transportée par l'Amazonie, depuis les Andes jusqu'à la plaine d'inondation. C'est une matière organique âgée (plusieurs dizaines à centaines d'années) et peu dégradable. Elle a pour origine l'érosion des roches andines et le lessivage des sols du

bassin en amont. À l'inverse, la matière organique produite dans les *várzeas* a pour origine la production primaire (les macrophytes et le phytoplancton) récemment produite (quelques mois à quelques années), riche en azote et facilement dégradable. C'est cette matière organique qui va se dégrader progressivement dans les plaines d'inondation et qui va produire naturellement le dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, le méthane, qui sont des gaz à effet de serre.

En conclusion

La mise en place d'un observatoire sur l'environnement amazonien incluant la plaine d'inondation a permis de nombreuses avancées scientifiques sur le plus grand bassin hydrologique de la planète. À l'échelle du bassin de l'Amazone, les *várzeas* ont une influence importante sur la dynamique hydrologique, sédimentaire et biochimique du fleuve. De 20 % à 30 % des eaux de l'Amazone sont stockées dans les *várzeas* ou les traversent. Cela explique pourquoi les crues de l'Amazone ne sont pas aussi puissantes qu'elles devraient être, une grande partie de l'eau de la crue étant stockée temporairement dans les *várzeas*, puis restituée au fleuve (et à la nappe alluviale) pendant la période de décrue. Concernant les sédiments arrachés des Andes et transportés par le fleuve, on estime que 80 % transitent par les *várzeas*. Chaque année, 2 milliards de tonnes entrent ainsi dans le système des plaines d'inondation et 1,5 milliard de tonnes en sort, le reste étant piégé temporairement (ou définitivement à l'échelle humaine) dans les *várzeas*. Si les eaux ne sont retenues que quelques mois, les sédiments eux peuvent y rester stockés des centaines, voire des milliers d'années. Enfin, ces zones sont caractérisées par une très forte productivité primaire dont la dégradation bactérienne est à l'origine de l'émission de gaz à effet de serre. À l'échelle globale, les flux de dioxyde de carbone et de méthane provenant des plaines d'inondation des fleuves tropicaux sont loin d'être négligeables.

Notre étude a porté sur un système encore très peu influencé par les activités humaines. Seules les activités artisanales de pêche et d'élevage étaient présentes dans la *várzea* de Curuaí. Aujourd'hui, les transformations liées aux activités humaines (pêche et élevage semi-industriels, briqueterie...), conduisant progressivement à une dégradation de ces milieux, augmentent la vulnérabilité des populations et l'exode rural. Une des voies de recherche actuelle porte sur l'étude des interactions entre les populations locales et les changements du milieu, ainsi que sur les processus d'adaptation des sociétés en réponse aux fluctuations climatiques et aux changements socio-environnementaux. Comme pour l'ensemble des plaines d'inondation du monde, les *várzeas* amazoniennes sont des zones écologiquement sensibles à des pressions anthropiques et climatiques. Elles sont aujourd'hui considérées parmi les milieux les plus menacés par les altérations que subit le bassin, en particulier par les changements d'occupation des sols, par la déforestation, par l'aménagement des fleuves (pour la production d'énergie hydroélectrique) et par les fluctuations climatiques qui influencent directement le régime hydrologique des fleuves auxquels elles sont associées.



Paysage des plaines d'inondation, Brésil.

Pour en savoir plus

BONNET M. P. et al., 2008 – *Floodplain hydrology in an Amazon floodplain lake (Lago Grande de Curuai)*. *Journal of Hydrology*, 1-2, 0022-1694.

MARTINEZ J.-M. et al., 2015 – The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 1, n. 860 : 1-11.

MAURICE BOURGOIN L. et al., 2007 – Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuai floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, 1-2, 0022-1694.

MOREIRA-TURCQ P. et al., 2013 – Seasonal variability in concentration, composition, age, and fluxes of particulate organic carbon exchanged between the floodplain and Amazon River. *Global Biogeochemical Cycles*, 27 (1) : 119-130.

Ont participé aux recherches

Patrick Seyler (IRD), Geraldo Boaventura (université de Brasilia), Naziano Filizola (université fédérale d'Amazonas), Laurence Maurice-Bourgoin (IRD), Patricia Moreira-Turcq (IRD), Jean-Michel Martinez (IRD).

6

L'ichtyologie amazonienne

Avec plus de 2 500 espèces actuellement répertoriées, la faune des poissons de l'Amazone représente plus de 15 % de l'ensemble des espèces de poissons d'eau douce décrites au monde. De nouvelles espèces sont décrites chaque année.

La faune de poissons n'est pas seulement riche en espèces, mais montre également une diversité exceptionnelle de formes et de stratégies écologiques au regard des autres cours d'eau de la planète.

Les raisons de cette méga-biodiversité ont intrigué les naturalistes depuis le XIX^e siècle et continuent de rendre perplexes les systématiciens, écologues et paléontologues contemporains.

PARTENAIRES

Université fédérale d'Amazonas (Ufam),
Brésil

Université nationale de Brasilia (UnB),
Brésil

Université fédérale de Rondônia (Unir),
Brésil

Université fédérale de Minas Gerais
(UFMG), Brésil

Université fédérale de São Paulo
(Unifesp), Brésil

Université fédérale de Goiás (UFG),
Brésil

Institut national de recherches
amazoniennes (INPA), Brésil

Université nationale de Mato Grosso
do Sul (UEMGs), Brésil

Université nationale de Maringá (UEM),
Brésil

Contexte

Les écosystèmes aquatiques du bassin de l'Amazone couvrent une superficie de plus de 1 million de kilomètres carrés et drainent près de 7 millions de kilomètres carrés de forêt tropicale humide ou de savane. Ces chiffres impressionnants font du bassin amazonien le plus grand réservoir d'eau douce du monde, déversant annuellement dans l'océan Atlantique 20 % du débit mondial des cours d'eau et abritant une diversité de vie spectaculaire. C'est particulièrement vrai concernant les poissons qui, avec environ 2 500 espèces actuellement répertoriées, représentent plus de 15 % de l'ensemble des espèces de poissons d'eau douce décrites au monde. Par ailleurs, si l'on se fonde sur les nouvelles espèces décrites annuellement, il est plus que probable que la richesse actuelle connue soit grandement sous-estimée. La faune de poissons n'est pas seulement riche en espèces, mais montre également une diversité exceptionnelle de formes et de stratégies écologiques au regard du reste des cours d'eau de la planète. Les raisons de cette méga-biodiversité ont intrigué les naturalistes depuis le XIX^e siècle et continuent de rendre perplexes les systématiciens, écologues et paléontologues contemporains.

L'ichtyologie à l'IRD (de 1943 à 1998 : ORSC, puis Orstom) s'est tout d'abord développée en Afrique dans les années 1950 par des études sur le lac Tchad, en collaboration étroite avec le laboratoire et les collections d'ichtyologie du MNHN de Paris. Les études portaient à la fois sur les connaissances en histoire naturelle, en systématique et en taxonomie des poissons, puis sur l'utilisation des ressources ichtyologiques par les pêcheries continentales. Dans les années 1980, forts de leur savoir-faire et de leurs expériences africaines,



Zones inondées dans le bassin amazonien.

une partie des chercheurs en hydrobiologie et ichtyologie de l'Orstom, en lien avec leurs collègues du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) de Paris, se tournent vers le continent sud-américain. Ils sont attirés par l'extrême biodiversité de l'Amazonie, mais aussi par les menaces que les pressions liées au développement font peser sur ces systèmes aquatiques continentaux uniques par leur diversité, leur fonctionnement et leur ampleur. Dès 1979, une collaboration est établie avec l'Institut national de recherche en Amazonie (INPA) de Manaus pour une « étude sur la gestion des ressources d'eau douce en Amazonie ». Des chercheurs IRD s'installeront auprès de leurs collègues brésiliens de l'INPA et participeront à la formation de nombreux ichtyologues brésiliens jusque dans le milieu des années 1990. Par la suite, malgré l'absence de chercheurs français sur place, les collaborations resteront actives. Elles se maintiennent encore à l'heure actuelle et se sont diversifiées auprès d'autres institutions de recherche brésiliennes. Les équipes de l'IRD ont ainsi pu participer à l'immense effort d'inventaire de la faune amazonienne et à la mise en place de collections et de catalogues d'espèces qui restent encore actuellement des références pour la recherche.

Au-delà des approches en systématique et de taxonomie, ces premières études portaient dans le même temps sur l'écologie et la distribution des espèces, afin de décrypter leurs stratégies écologiques, et sur l'évaluation des

PARTENAIRES

ONG Ecoporé

Centre national de surveillance et d'alerte sur les désastres naturels (Cemaden), Brésil

Université Mayor de San Andres (UMSA), La Paz, Bolivie

Université de Buenos Aires (UBA), Argentine



Pêche dans les rapides du Rio Madeira, désormais recouverts par les eaux du barrage de Santo-Antonio.

impacts des activités anthropiques sur les communautés de poissons. Ces études cherchaient notamment à comprendre les causes et les mécanismes qui entraînent les fortes productivités biologiques des systèmes amazoniens. De nombreuses activités ont été développées, par exemple sur un lac de várzea relié au fleuve Amazone, le Lago dos Reis, près de Manaus, grâce à un projet interdisciplinaire (financé en partie par la Communauté européenne et auquel ont participé l'INPA, l'Orstom et l'institut Max-Planck). Ces études offraient ainsi les connaissances biologiques et statistiques nécessaires à l'interprétation de l'impact des pêcheries et des facteurs environnementaux sur les stocks de poissons, afin de produire des éléments de gestion.

Dans un autre domaine, des études ont été menées pour comprendre les modifications de communautés de poissons produites par la mise en service de grands barrages hydroélectriques sur les affluents de l'Amazone, comme le barrage de Tucuruí sur le Tocantins ou celui de Balbina sur le Rio Uatumã. Ces études, réalisées en coopération avec Centrais elétricas do Norte do Brasil S.A. (Elettronorte), avaient pour objectif de mettre en valeur les milieux aquatiques de ces régions et prévenir les conséquences de ces ouvrages sur la biodiversité et sur les pêcheries.

Ces études fondatrices ont été reprises dans d'autres régions d'Amérique du Sud : en Amazonie bolivienne pour l'étude de la biodiversité, du fonctionnement des écosystèmes de plaine d'inondation et de la pêche ; puis en Guyane pour l'étude des impacts du barrage de Petit Saut. D'autres études ont aussi été menées avec les mêmes objectifs dans les piémonts ando-amazoniens, notamment en Bolivie.

Ces expériences et les connaissances acquises ont servi à alimenter des recherches plus avancées sur le fonctionnement écologique des systèmes, l'évolution phylogénétique de la faune, la distribution des espèces en relation avec des facteurs environnementaux ainsi que sur l'aquaculture. Par exemple, entre 1995 et 1999, des études sur les lacs du Nord-Ouest brésilien ont démontré les processus de cascades trophiques à l'œuvre dans certains cas d'eutrophisation (ou déséquilibre d'un écosystème aquatique lié à un apport excessif d'éléments nutritifs, entraînant en particulier une prolifération végétale et un appauvrissement en oxygène) en présence ou absence de certaines espèces de poissons. Les résultats ont ainsi permis de proposer des éléments de gestion de ces lacs pour maîtriser les productions de poissons et l'eutrophisation. Entre 2004 et 2007, dans la continuité de premières études sur la contamination par le mercure menées par des hydrogéochimistes, des études interdisciplinaires ont été réalisées sur la rivière Iténez à la frontière entre la Bolivie et le Brésil.

Les équipes de l'IRD participent au renforcement des capacités et à la progression des connaissances en apportant leurs expertises sur les nouveaux outils d'analyse des poissons et de l'écologie. Génétique, datations, écologie isotopique, analyses statistiques macro-écologiques sont les disciplines sur lesquelles les collaborations entre l'IRD et le Brésil ont été les plus actives dans la dernière décennie.

Le projet AmazonFish, coordonné par l'IRD en collaboration avec ses partenaires en Amérique du Sud et notamment au Brésil, a démarré en 2016 avec

pour objectifs principaux de faire une synthèse des inventaires de la biodiversité des poissons amazoniens, d'évaluer leur distribution et de connaître l'histoire et l'évolution de cette biodiversité afin de définir sa vulnérabilité et anticiper les changements. Outre son intérêt scientifique majeur, l'importance de ce projet pour l'IRD est de mettre en réseau différents partenaires d'Amérique du Sud sur une thématique scientifique et géographique commune. Par ailleurs, dans le prolongement d'AmazonFish, un nouveau projet coordonné par l'IRD et financé par BiodivERSA (partenariat européen qui finance des recherches sur la biodiversité et ses impacts sur les sociétés et les politiques publiques) démarre en 2022. Il regroupe un consortium de chercheurs européens et brésiliens et sera centré sur les espèces de poissons frugivores de l'Amazonie. Ces espèces jouent un rôle fondamental dans l'interaction animal- plante et le maintien de la diversité biologique et fonctionnelle des écosystèmes amazoniens, car ils aident la végétation riveraine à se maintenir en répandant des graines le long des cours d'eau et jouent également un rôle socio-économique fondamental pour les communautés humaines traditionnelles amazoniennes comme principales sources de nourriture et de revenus. L'objectif du projet est d'identifier les zones prioritaires pour la conservation et la restauration des interactions entre la forêt amazonienne et les poissons frugivores et les services écosystémiques associés.

Comment fait-on ?

Au-delà du recensement de la biodiversité, les études actuelles visent à mieux comprendre et définir les stratégies écologiques des poissons. Dans les systèmes complexes comme l'Amazonie, les migrations des poissons d'eau douce sont essentielles pour le maintien de la biodiversité, la gestion des stocks de pêche et l'évaluation de l'impact des barrages hydroélectriques. Ces mouvements migratoires restent très méconnus car les méthodes classiques d'observation sont inefficaces. Elles sont actuellement renforcées par des techniques de suivi indirect par des marqueurs biogéochimiques. Les otolithes des poissons sont de petites pierres calcaires situées à proximité de leur cerveau. Elles grandissent en même temps que le poisson et présentent des stries de croissance qui se forment régulièrement tout au long de



Poisson de la famille des Loricariidae (*Pseudacanthicus* sp.).

la vie de l'individu. Grâce à ces stries, il est possible de déterminer l'âge des organismes (il s'agit de la méthode dite de sclérochronologie, par analogie avec la détermination de l'âge des arbres par la dendrochronologie) ; et leur composition chimique est une mémoire des conditions environnementales et physiologiques de l'organisme. En Amérique du Sud, l'IRD et ses partenaires français et sud-américains réalisent des analyses des éléments isotopiques du strontium présents dans l'eau et dans les otolithes pour discriminer les stocks de poissons, identifier les habitats clés et les migrations. Les routes migratoires des grands poissons-chats entre l'estuaire de l'Amazonie et les piémonts andins où ils se reproduisent ont ainsi pu être déterminées avec précision.

Quels sont les résultats importants ?

Des études de génétique des populations, réalisées dans le cadre du LMI Edia (laboratoire mixte international Évolution et Domestication de l'ichtyofaune amazonienne, 2011-2021) ont été utilisées pour comprendre l'évolution des poissons. Ces études ont mis en évidence des mosaïques d'espèces chez les Cichlidés, laissant supposer l'intervention d'une spéciation sympatrique – une spéciation sympatrique fait que de nouvelles espèces très proches émergent d'un ancêtre commun alors qu'elles habitent la même région géographique – à l'instar de celle mise en évidence dans le Rift africain. Le LMI Edia est aussi à l'origine de nouvelles approches sur la biodiversité en Amazonie, telles que celle menée sur les grands migrateurs à l'aide des isotopes du strontium, présentée dans le paragraphe précédent, mais aussi sur l'étude du recrutement larvaire par les techniques de métabarcoding (identification moléculaire de plusieurs espèces d'un même échantillon à partir d'une courte séquence d'ADN caractéristique de l'espèce), et, plus récemment, les premières études d'évaluation de la biodiversité à l'aide de l'approche d'ADN environnemental (ADNe). L'ADNe est une méthode indirecte d'évaluation de la présence des organismes vivants, bien adaptée aux milieux aquatiques où elle est de plus en plus utilisée. L'échantillonnage consiste à filtrer de l'eau dans le but de collecter les fragments d'ADN libérés dans l'environnement sous différentes formes (fèces, urine, gamètes, mucus, peau, etc.) et qui persistent dans les milieux aquatiques pendant plusieurs jours. Ces fragments sont extraits, puis amplifiés. Des séquences d'une même région d'ADN présentant un codage unique pour chaque espèce sont isolées, puis comparées à une banque de données de référence pour déterminer l'espèce. En ichtyologie, la capture des poissons à des fins scientifiques et expérimentales reste une difficulté. L'apport de l'ADNe pourrait donc constituer un saut technologique important pour compléter les inventaires et réaliser un meilleur suivi de la biodiversité dans les milieux complexes et difficiles d'accès comme les rivières andines et amazoniennes.



Microscopie d'une larve de poisson amazonien.

En conclusion

Le futur des collaborations continuera à s'inscrire dans les mêmes objectifs d'inventaire des espèces et d'amélioration des connaissances de l'histoire naturelle, de l'écologie et de la distribution des poissons en faveur de solutions pour la protection de la biodiversité et une gestion durable des ressources. De nouvelles techniques se développent continuellement pour mieux répondre à ces objectifs et constituent de nouveaux thèmes de collaborations. C'est par exemple le cas pour l'ADNe, qui devrait se développer rapidement dans les

prochaines années. Plusieurs initiatives impliquant des laboratoires français et sud-américains associés à l'IRD sont en cours de développement dans les pays amazoniens (Bolivie, Brésil, Pérou, Colombie) et en Guyane.

Entre 1980 et l'actuel, les chercheurs de l'IRD et leurs partenaires français ont beaucoup gagné en expertise et en excellence scientifique sur les outils et les concepts de l'écologie aquatique en général, et de l'ichtyologie en particulier. Ils sont à même, et c'est l'une des missions principales de l'IRD, de participer à la formation des chercheurs amazoniens, au renforcement des institutions et aux transferts de ces technologies. Malheureusement, dans le même temps, l'expertise sur l'histoire naturelle et la systématique tend à disparaître. Le lien avec les musées et les collections (en particulier le MNHN de Paris) est maintenu mais ne compense pas cette perte d'expertise, car les chercheurs spécialistes de ces domaines ne sont remplacés ni à l'IRD, ni au MNHN. Cette tendance est préoccupante, car cette expertise et ces connaissances forment les bases de la compréhension des changements qui s'opèrent et sont les sources d'inspiration pour l'innovation vers de nouvelles solutions pour la protection de la biodiversité et une gestion durable des ressources et des services écosystémiques que nous rendent les milieux aquatiques continentaux, et les poissons en particulier. Cette tendance est moins marquée chez nos partenaires brésiliens et sud-américains, offrant une nouvelle voie de complémentarité dans nos collaborations.

Pour en savoir plus

<https://www.amazon-fish.com/>

Portail de données freshwaterfishdata

Ont participé aux recherches

Marc Pouilly (IRD), Carlos Freitas (université fédérale d'Amazonas), Flavia Siquiera (université fédérale d'Amazonas), Pablo Tedesco (IRD), Thierry Oberdorff (IRD), Jean-Francois Renno (IRD).

7

Ressources en eau et données spatiales

Entre les années 2000 et aujourd'hui,
la surveillance et la modélisation
des composantes du cycle hydrologique
à l'aide de l'observation de la Terre par satellite
sont devenues une réalité.

Il reste néanmoins du chemin à parcourir
pour que ces avancées scientifiques
se traduisent par des applications efficaces
dans la gestion des ressources en eau
et la prise de décision qui en découle.



Calibrer les mesures satellitaires
par des mesures GPS *in situ* :
campagne Rio Negro, mai 2005.

Le contexte

La télédétection satellitaire a révolutionné en quelques décennies la compréhension du cycle de l'eau sur les continents. Depuis l'espace, il est désormais possible d'obtenir nombre d'informations sur le fonctionnement des fleuves, des rivières, des lacs et des zones humides qui échappaient jusqu'ici à nos connaissances.

L'hydrologie spatiale et les modèles numériques qu'elle alimente œuvrent maintenant au développement d'applications précieuses pour la gestion et la préservation de la ressource en eau.

Au début des années 1990, la réussite des satellites dédiés à l'étude de l'océan et de l'atmosphère donne des idées aux hydrologues. Les spécialistes des eaux continentales vont ainsi utiliser les missions et les instruments mis au point pour explorer les océans. Cela va ouvrir un champ nouveau permettant d'étudier les fleuves et leurs bassins, de mieux caractériser le cycle de l'eau dans son ensemble. L'objectif de développer des outils efficaces à partir de mesures depuis l'espace pour une gestion durable de la ressource en eau devient réalisable.

Avec son débit gigantesque, son étendue immense, ses cours d'eau majeurs et ses phénomènes naturels d'ampleur inégalée, l'Amazone et son vaste bassin ont constitué un laboratoire idéal pour le développement de ces nouvelles techniques d'observation du cycle de l'eau par satellite. L'IRD et ses partenaires scientifiques du Brésil et d'autres pays d'Amérique du Sud collaborent ainsi depuis plus de vingt ans sur le sujet, contribuant fortement au nouvel essor de l'hydrologie spatiale.

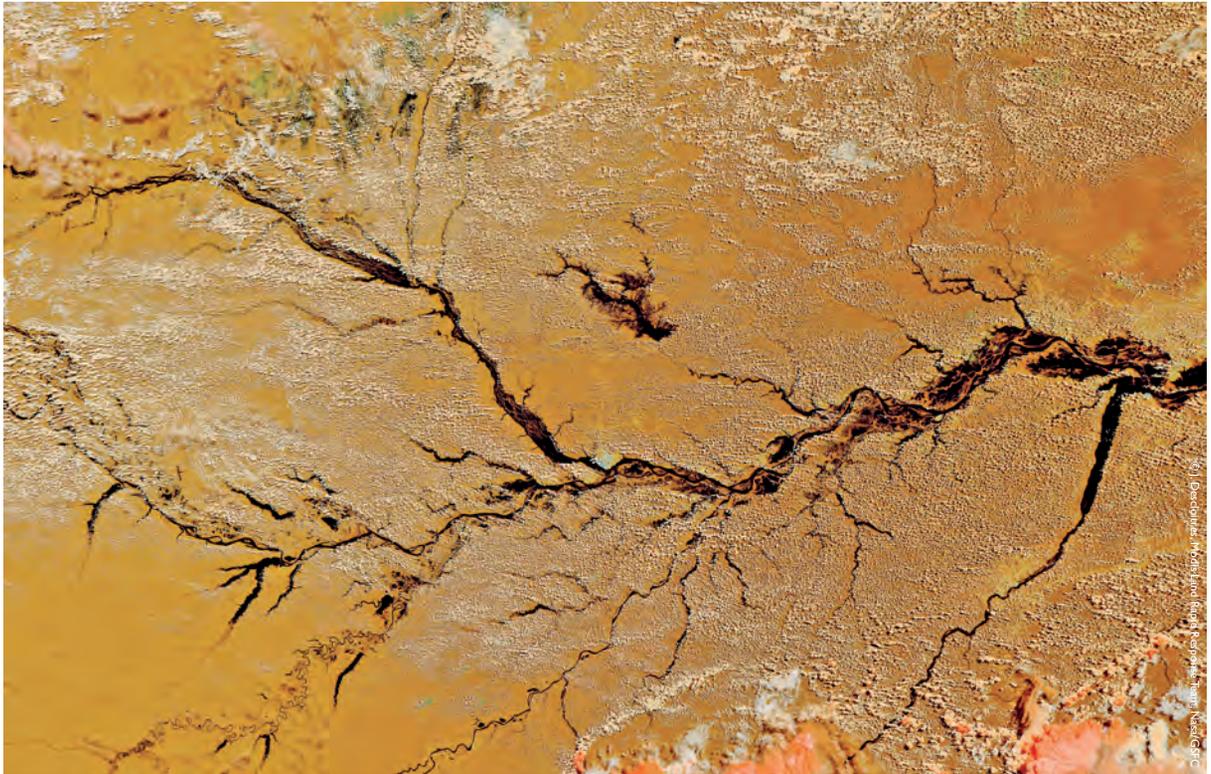


Image Modis en fausse couleur du cours de l'Amazone.

L'image est centrée sur la rencontre des eaux entre le Rio Negro au nord et le Solimões-Amazon de l'ouest vers l'est (<https://visibleearth.nasa.gov/images/59954/amazon-brazil>).

Quelles méthodes ont été utilisées ?

Du fait de son importance et du fort investissement historique des pays du bassin, l'Amazone bénéficie d'un réseau d'observations *in situ* relativement dense et assurant des relevés sur le long terme. Ces réseaux sont essentiels aux scientifiques pour comprendre les processus hydrologiques mais, sur un bassin aussi vaste, ils sont limités et ne permettent pas de couvrir l'ensemble de la variabilité spatio-temporelle des processus qui s'y déroulent. Certains phénomènes, telle l'étendue de la crue annuelle, sont presque impossibles à évaluer par mesures conventionnelles.

La télédétection représente donc un outil clé pour surmonter ces limites, car elle offre un point de vue d'observation plus large et permet d'étendre, à la fois dans le temps et dans l'espace, les observations pour obtenir une vue bien plus complète des phénomènes à l'œuvre. Ainsi, la couverture des zones d'intérêt devient large et régulière : les satellites d'observation de la Terre balayent toute la surface continentale, repassent fréquemment au-dessus des bassins étudiés. Beaucoup plus de données sont ainsi acquises et beaucoup plus souvent, améliorant considérablement notre appréhension du cycle de l'eau sur les continents.

PARTENAIRES

Université de Brasilia (UnB), Brésil

Université d'État d'Amazonas (UEA),
Brésil

Université fédérale d'Amazonas (Ufam),
Brésil

Université fédérale de Rio Grande
do Sul (UFRGS), Brésil

Service géologique du Brésil
(SGB-CPRM), Brésil

Université fédérale de Minas Gerais
(UFMG), Brésil

Grâce à des méthodologies spécifiques d'analyse, les hydrologues exploitent désormais les données acquises par de nombreux satellites.

Toutes sortes de techniques et de capteurs sont utilisés : des satellites orbitaux croisant à quelques centaines ou milliers de kilomètres d'altitude, des satellites géostationnaires accompagnant la rotation de la Terre à 36 500 km de sa surface, des techniques d'observation couvrant le spectre électromagnétique, de l'optique aux micro-ondes, mais aussi des capteurs passifs qui enregistrent les signaux émis par la Terre et des instruments actifs qui émettent un signal vers notre planète et enregistrent sa réflexion.

Des informations impossibles à déterminer à grande échelle depuis le sol deviennent alors accessibles, comme mesurer les précipitations, l'étendue des inondations, les stocks d'eaux, ou des variables très importantes comme l'évapotranspiration ou la qualité des eaux. Grâce aux instruments capables de déceler une évolution locale de la gravité terrestre (portés par les satellites jumeaux des missions Grace et Grace-FO), il est possible de mesurer les variations temporelles et spatiales de la quantité totale d'eau présente à un moment donné dans un bassin aussi vaste que celui de l'Amazonie. L'étendue d'eau est estimée en croisant des émissions passives et actives de micro-ondes (radiomètres) et de la réception des ondes infrarouges et visibles (satellites LandSat, Sentinel-2).

Chargés de surveiller l'évolution du niveau de la mer, les altimètres peuvent aussi mesurer les variations des niveaux des eaux continentales. Le traitement des données issues de Topex-Poseidon, ERS1/2, Envisat, Jason 1/2/3/CS et Sentinel 3-A/B permet désormais de déterminer l'élévation des niveaux d'eau des rivières, des réservoirs, des lacs et des zones humides de dimensions toujours plus petites et leurs variations sur le long terme. Les spécialistes travaillent désormais au développement de satellites spécifiquement dédiés à l'hydrologie de surface, comme la mission franco-américaine Surface Water and Ocean Topography (SWOT), dont le lancement est prévu en décembre 2022. Développée en coopération entre la Nasa et le CNES, SWOT, dont l'IRD et ses partenaires sont un acteur majeur, est une mission d'altimétrie large fauchée, qui, du fait de sa couverture spatio-temporelle, fournira pour la première fois une information spatialisée précise de la dynamique des hauteurs, de l'étendue des eaux de surface continentale avec une très bonne résolution spatiale (100 m). Il sera donc possible d'avoir accès, pour la première fois et à l'échelle globale, à des informations détaillées sur la dynamique des stocks des eaux de surface, des débits et de l'hydrodynamique des bassins versants avec une résolution spatiale et temporelle sans précédent.

Pour autant, l'utilisation des satellites ne disqualifie en rien l'observation *in situ* et doit donc être considérée comme complémentaire : les variables relevées sur le terrain restent indispensables pour valider et calibrer les données spatiales.

L'utilisation des données satellitaires pour l'hydrologie connaît tout de même des limites, souvent liées à la résolution spatio-temporelle, à la durée et à la précision des mesures. Par exemple, sur l'Amazonie, l'utilisation des observations visibles/optiques, qui sont des outils très puissants, est limitée par la



Vue d'artiste du satellite SWOT (AVISO Gallery, images and movies of Earth Observation).

couverture de nuages et de végétation dense. Il y a aussi souvent un compromis entre l'échantillonnage (combien de fois le satellite passe au-dessus d'un même point) et la couverture spatiale (taille de la zone). Certaines techniques comme les radars à synthèse d'ouverture (SAR) montrent de très grandes capacités pour mesurer l'étendue des eaux de surface à haute résolution (10 à 100 m), mais elles souffrent d'un faible temps de revisite temporelle, ce qui les rend inadaptées à la surveillance des processus hydrologiques rapides. En outre, malgré le nombre croissant de données satellitaires, il est toujours nécessaire d'assurer des séries temporelles suffisamment longues pour comprendre et étudier les changements environnementaux, surtout dans des bassins importants comme en Amazonie.

Grâce aux modèles informatiques qui se nourrissent des milliers de téraoctets acquis et traités quotidiennement par les satellites, et qui visent à reproduire les processus hydrologiques naturels, nous pouvons désormais prévoir dans l'espace et dans le temps les événements futurs. En les alimentant avec les variables relevées sur le bassin – précipitations, évapotranspiration, niveaux et stock total d'eau dans la région... –, nous pouvons désormais alerter en cas d'événements extrêmes comme les inondations et les sécheresses, avec une bonne précision spatiale et temporelle. Au-delà de leur intérêt scientifique, les prévisions établies par les hydrologues ont de précieuses applications pour la société et l'environnement : optimisation des prélèvements d'eau, des lâchers de barrages, de la pêche, de la navigation fluviale pour les utilisateurs et les gestionnaires de la ressource, planification des aménagements pour les décideurs et, plus globalement, préservation des milieux naturels et du climat.

Que pouvons-nous dire des principaux résultats ?

Les observations par satellite ont changé la donne pour la science en Amazonie, permettant de mieux connaître le plus grand bassin du monde. L'hydrologie de l'Amazonie a un impact considérable sur le climat régional et mondial. Par exemple, le bassin de l'Amazone fournit de l'humidité aux parties sud de l'Amérique du Sud. En tant que grande source de chaleur dans les tropiques et de forts processus convectifs, il a également un impact significatif sur la circulation atmosphérique mondiale. En outre, les eaux de surface de l'Amazone sont une source et un puits importants de dioxyde de carbone et la plus grande source géographique naturelle de méthane sous les tropiques. De par ses taux élevés de précipitations, d'évaporation et de débit fluvial, le bassin de l'Amazone est donc le siège de signaux hydrologiques très marqués, avec à la fois des variations saisonnières et des variations interannuelles fortes qui résultent de grands phénomènes climatiques.

On peut noter en tant que résultats importants la caractérisation des précipitations dépendant du relief dans la région des Andes, la caractérisation de l'étendue des inondations dans le bassin, l'estimation de la quantité d'eau stockée annuellement dans les plaines d'inondation de l'Amazone et dans les eaux souterraines.

Un des résultats majeurs de l'utilisation des observations satellitaires en Amazonie est l'estimation du niveau de l'eau à partir de l'altimétrie radar, qui a été réalisée pour la première fois dans les larges rivières du bassin de l'Amazone. Cela a permis de caractériser l'évolution saisonnière des niveaux

d'eau lors de l'onde d'inondation au sein du bassin, ou de s'intéresser à l'impact des sécheresses, comme celle de 2005, sur la ressource en eau. Combinée à l'imagerie, l'altimétrie a également permis de fournir les premières estimations des variations du stockage d'eau de surface dans le bassin. En synergie avec les estimations du stock total de l'eau sur les continents par le satellite Grace, cela a permis de renseigner les scientifiques sur les variations des eaux souterraines dans l'Amazonie. Les observations spatiales mettent aussi en évidence la variabilité spatiale des précipitations due à l'effet de brise qui se produit sur les grandes masses d'eau du bassin ; elles ont permis de révéler la variation spatio-temporelle de la concentration de sédiments dans les rivières et les lacs, la caractérisation de la topographie complexe des plaines d'inondation, et des masses d'eau échangées entre la rivière et la plaine d'inondation.

Les observations spatiales sur le long terme fournissent également des informations précieuses sur les tendances des variables hydrologiques qui témoignent des changements récents dans le bassin. Les satellites ont ainsi montré une tendance à l'augmentation des précipitations dans la partie nord du bassin, du débit et des zones inondées, ce qui contribue à des risques d'inondation accrus, avec de fortes implications pour les popu-

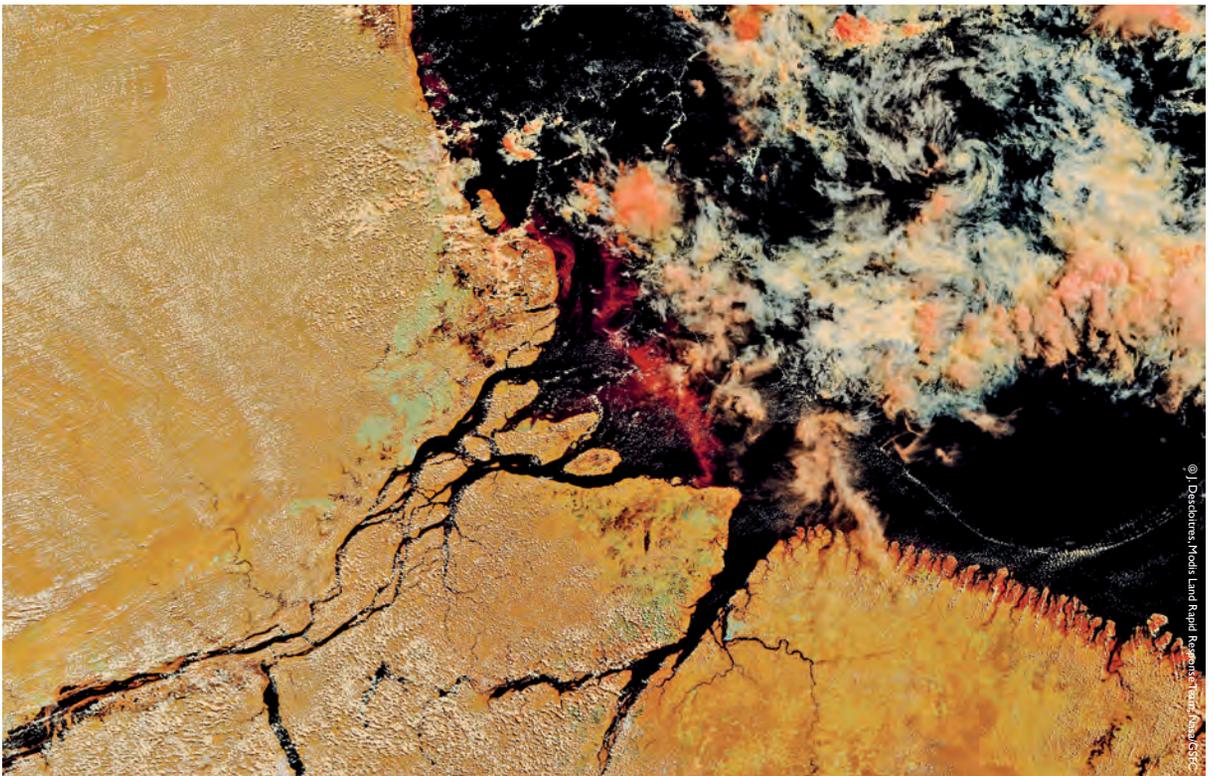


Image Modis de l'embouchure de l'Amazonie.
L'image montre la rencontre du fleuve avec l'océan Atlantique
(<https://visibleearth.nasa.gov/images/59942/mouth-of-the-amazon-brazil>).

lations, les rendant plus vulnérables. À l'inverse, la région sud du bassin connaît une réduction des précipitations, entraînant un allongement de la période sèche ces dernières années, générant un stress hydrique dans les forêts tropicales avec de fortes conséquences sur la biodiversité. En outre, les influences anthropiques telles que la déforestation et l'exploitation minière ont provoqué une augmentation de la concentration de sédiments et de nutriments dans les rivières.

Quels sont les grands enjeux de ces recherches ?

L'eau, élément clé de la vie, représente un défi majeur global. Elle est donc au cœur de la politique de recherche de l'IRD et de ses partenaires. En effet, comme nous l'avons vu, le stockage et le flux d'eau douce sur les continents, et leur variabilité, restent très méconnus dans de nombreuses régions du monde. Ce contexte laisse ouvertes des questions majeures concernant la disponibilité de l'eau sur les terres et ses futures évolutions en lien avec le système climatique (« grand cycle de l'eau ») et les usages anthropiques de la ressource (« petit cycle de l'eau » et irrigation).

Les scientifiques cherchent à quantifier les interactions entre les cycles de l'eau, le changement climatique et les sociétés, afin de fournir des connaissances solides pour concevoir des solutions durables de développement et d'adaptation. L'hydrologie spatiale est désormais un pilier de cette approche.

Dans cet effort global, l'Amazonie a toujours représenté un chantier précurseur pour le développement des recherches, dans des approches interdisciplinaires, fournissant des bases scientifiques solides pour la mise en place de solutions d'adaptation durables au Sud.

Par nature, les satellites ne connaissant généralement pas de frontières terrestres, de nombreuses techniques de télédétection développées et testées en Amazonie ont ensuite été utilisées dans le monde entier.

Un nouvel essor de l'hydrologie spatiale est attendu avec les lancements à venir de plateformes satellitaires dédiées à l'hydrologie. À l'instar de ce qui s'est produit il y a quelques décennies dans le domaine de la recherche océanique avec le lancement des premiers altimètres, l'exploitation de ces nouvelles techniques de télédétection va représenter une véritable « révolution » dans le domaine de l'hydrologie continentale et de l'étude du cycle de l'eau.

Ce nouveau contexte permettra de franchir une nouvelle étape dans la surveillance des eaux amazoniennes depuis l'espace. De nouvelles recherches pourront émerger, visant à discriminer les parts climatiques et anthropiques à l'origine de la variabilité des ressources en eau, un facteur essentiel pour apporter des éléments objectifs de prise de décision dans le domaine de la gestion de la ressource.

Dans un effort global pour mieux comprendre les logiques sociales d'usage de l'eau et la façon dont les informations climatiques et hydrologiques sont intégrées dans la gestion de cette ressource dans les différentes activités (agriculture, énergie), l'hydrologie spatiale a sa part à jouer en collaboration avec les sciences sociales et humaines dans des projets interdisciplinaires

et intersectoriels. Ces nouveaux jeux de données et l'analyse des pratiques sociales offrent aussi un moyen unique d'analyser l'impact du changement climatique et de la pression anthropique sur le cycle de l'eau et les écosystèmes, qui affectent en retour le grand cycle de l'eau et les ressources. Ces résultats viennent ensuite compléter la perception des populations et fournissent des informations essentielles pour l'analyse et l'accompagnement des processus d'adaptation.

En conclusion

D'un point de vue technique, de nouvelles technologies et méthodologies d'observation de la Terre sont continuellement développées pour surveiller l'environnement. Les programmes de nano-satellites restent encore sous-exploités pour l'hydrologie, bien qu'ils offrent de grands potentiels pour surveiller l'évolution d'événements tels que les inondations, à des coûts inférieurs à ceux de leurs homologues plus grands. Outre le concept des missions satellitaires, l'avènement de nouvelles mesures spatiales, comme la vidéo haute définition en temps réel pour la surveillance de l'environnement, ou les mesures à partir de véhicules aériens sans pilote ou de petits drones offrent de grandes possibilités. Dans un avenir proche, cela repoussera probablement les contraintes spatio-temporelles actuelles. Néanmoins, la disponibilité massive d'informations, avec la production possible de pétaoctets de données, mettra au défi les capacités actuelles de stockage et d'analyse. Cela nécessitera de nouvelles approches et capacités analytiques pour interpréter des volumes de données aussi massifs.

Ainsi, un meilleur couplage des ensembles de données d'observation de la Terre avec les modèles hydrologiques/hydrauliques et les modèles de surface terrestre (comme l'assimilation de données) est une étape nécessaire dans la modélisation du système terrestre en considérant l'aspect dynamique de l'hydrologie amazonienne.

De nouveaux outils ou techniques de fusion basés sur l'intelligence artificielle et une puissance de calcul accrue seront nécessaires. Ces nouvelles possibilités nécessitent un effort conjoint des agences spatiales, du secteur commercial et des start-up.

Par ailleurs, d'un point de vue scientifique, il reste de nombreuses questions non résolues pour le bassin amazonien, pour lesquelles des recherches, le développement de données ou de modélisations supplémentaires sont nécessaires. Alors qu'il est soumis à de multiples pressions naturelles et anthropiques, notamment les barrages, l'exploitation minière, les incendies, les sécheresses/inondations et la déforestation, il est urgent de comprendre comment le cycle hydrologique de l'Amazonie est affecté. Malgré les progrès récents, il existe peu d'études qui abordent ces questions de manière intégrée.

La télédétection a ainsi le potentiel de démocratiser des outils essentiels pour les décideurs et de fournir de nouveaux moyens de surveillance de l'environnement. Mais ces progrès doivent encore se traduire au travers d'un soutien réel à la gouvernance de l'eau et de l'environnement. La communauté de la télédétection est donc confrontée à de véritables défis afin de promouvoir

ces nouvelles connaissances et innovations d'une manière qui soit plus utile pour les sociétés. Cela passe par la promotion d'approches interdisciplinaires par des systèmes de gestion de l'eau plus inclusifs et par la formation des décideurs aux progrès et avancées actuels de l'observation de la Terre.

En plus d'offrir ces grandes possibilités pour la surveillance opérationnelle des systèmes hydrologiques, ces observations pourraient aussi permettre de renseigner les gestionnaires sur le potentiel des ressources en eau pour les centrales hydroélectriques, les systèmes d'irrigation, le transport fluvial et le fret.

Si l'observation de la Terre par satellite a permis des avancées scientifiques décisives dans la compréhension du cycle de l'eau en Amazonie au cours des dernières décennies, il reste encore de nombreux défis à relever pour pérenniser un avenir plus durable pour le plus grand bassin du monde.

Pour en savoir plus

FASSONI-ANDRADE A. *et al.*, 2021 – Amazon hydrology from space: scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59. e2020RG000728. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

PAIVA R. C. D. *et al.*, 2013 – Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resour. Res.*, 49 : 1226-1243, <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>

PFEFFER J. *et al.*, 2014 – Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry. *Geophys. Res. Lett.*, 41 : 1981-1987. doi :10.1002/2013GL059134

Ont participé aux recherches

Rodrigo Paiva (UFRGS), Fabrice Papa (IRD), Frédérique Seyler (IRD), Stéphane Calmant (IRD), Frédéric Frappart (Inrae), Daniel Moreira (SGB-CPRM), Joecila Santos Da Silva (UEA), Marie-Paule Bonnet (IRD), Alice Fassoni (post-doctorante), Ayan Santos Fleischmann (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), Juan Gabriel Leon (université nationale de Colombie – Sede Palmira), Adrien Paris (Hydro Matters), Jean Michel Martinez (IRD), Claudio Barbosa (INPE), Luc Bourrel (IRD), Naziano Filizola (Ufam), Pascal Fraisy (IRD), Gérard Cochonneau (IRD), Ilce de Oliveira (Faculdade de Engenharia do Campus Várzea Grande da Universidade Federal de Mato Grosso), Sébastien Pinel (université de Perpignan Via Domitia, UPVD), Thibault Catry (IRD), Frédéric Satgé (IRD), Julia Pfeffer (post-doctorante), Emmanuel Roux (IRD), Justine Ringard (post-doctorante), Franck Mercier (Collecte Localisation Satellite), Augusto Getirana (Nasa/Goddard Space Flight Center, GFC), Achilles Monteiro (SGB-CPRM).

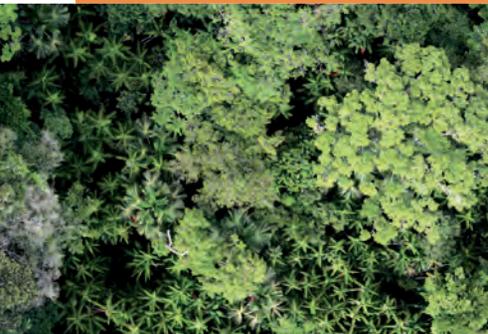
PARTIE 2

Canopée avec palmeraie
en Guyane.



LES INTERACTIONS GLOBAL-LOCAL

PARTIE 2



De même qu'un événement local peut provoquer un enchaînement de réactions qui se répercutent à l'échelle globale, les changements globaux (climat, pressions démographiques ou économiques) ont des impacts locaux importants, comme les inondations et les sécheresses. Cette deuxième partie traite des interconnexions entre l'écosystème amazonien et l'environnement global, l'océan et l'atmosphère.

L'estuaire de l'Amazone, système gigantesque de par l'importance des flux d'eau douce et de matières transportés vers l'océan, a une influence locale sur les populations riveraines, soumises au risque épisodique de submersion. Au niveau global, si ce flux d'eau douce venait à diminuer, l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord connaîtraient un réchauffement sensible du climat, et l'Amérique du Nord un refroidissement.

Sur les côtes soumises à l'influence amazonienne, la présence humaine entraîne la régression des mangroves protectrices et l'élévation du niveau de la mer, la modification de la température de surface des océans et l'aggravation des tempêtes océaniques, qui accroissent l'érosion des rivages.

Menée à la fin de l'année 2021 dans le cadre du laboratoire mixte international Tapioca, la campagne Amazomix a permis d'enregistrer une énorme quantité de données géophysiques et biologiques visant à mieux connaître les processus physiques en cours et leurs impacts.

Le climat, qu'il soit passé ou présent, illustre bien cette notion d'interconnexion entre le global et le local, qui fait l'objet de cette deuxième partie. La connaissance des climats passés nous permet de comprendre les impacts respectifs des modifications anthropiques et des fluctuations climatiques dans l'environnement d'aujourd'hui. L'étude du climat actuel nous renseigne sur les liens entre les fluctuations de température dans les océans Atlantique et Pacifique pour expliquer la variabilité des pluies, ainsi que sur le rôle majeur joué par la forêt tropicale sur les précipitations engendrées par l'évapotranspiration des arbres. Enfin, les modélisations du climat montrent clairement comment la déforestation agit sur la modification du climat global, engendrant un processus rétroactif qui pourrait signifier à terme la disparition de la forêt tropicale.

Le système estuarien de l'Amazone

Le système estuarien de l'Amazone est un objet géographique complexe, d'une variabilité extrême à la fois dans le temps et dans l'espace.

Il est étudié par l'IRD et ses partenaires depuis la fin des années 1980, mais seuls les outils numériques et les données satellitaires les plus récentes permettront la mise en œuvre d'un système de prévision opérationnel de l'aléa submersion sur l'ensemble de l'estuaire.

Contexte

La basse Amazone présente le système estuarien de tous les superlatifs. La marée océanique y pénètre sur plus de 800 km vers l'intérieur des terres, ce qui en fait le plus long estuaire au monde. En outre, cette région en forte croissance démographique, avec actuellement quatre millions d'habitants et un doublement de cette population tous les 20 ans, est soumise aux crues et aux sécheresses du grand fleuve. L'histoire de la recherche environnementale menée par l'IRD sur ce continuum continent/océan, à la fois unique et fascinant, a débuté à la fin des années 1980. Cette histoire est d'abord celle d'une multidisciplinarité, combinant l'hydrologie, l'océanographie, la sédimentologie et la géochimie, que le projet HyBAm, présenté dans le chapitre 1, a permis de réunir.

Le programme prend corps au début des années 1990, dans le cadre d'un programme conjoint Orstom-INSU (Programme environnement géosphère intertropicale, PEGI). En effet, l'Amazonie était déjà à cette époque un moteur de la croissance économique du Brésil comme réservoir de biodiversité et il importait de déterminer son potentiel hydroélectrique. Il s'agissait aussi de comprendre et d'anticiper les effets de la déforestation sur l'érosion des sols et la contamination des eaux de surface, et d'atténuer les impacts des grandes crues sur les activités humaines dans les grandes plaines d'inondation (*várzeas*). Il était suspecté que le comportement hydraulique, sédimentaire et biogéochimique des plaines d'inondation situées en aval d'Óbidos était fortement influencé par la marée océanique, qui les baigne deux fois par jour. Dès 2004, pour améliorer notre connaissance de l'interaction entre la marée océanique et les flux d'eau et de matière arrivant de l'amont du bassin versant, et ainsi quantifier les flux réellement exportés vers l'océan



Mesure des niveaux de l'eau de l'Amazone (programme HyBAm), Pérou.

Atlantique, il était nécessaire de simuler ces effets de l'hydrodynamique de l'estuaire à l'aide d'une modélisation numérique. D'un point de vue sociétal, cette modélisation devait contribuer à améliorer la sécurité de la navigation dans l'estuaire et à mieux comprendre les submersions massives affectant épisodiquement les centres urbains riverains.

Dès 1997, les chercheurs entreprennent de mesurer directement le débit total de l'Amazone à son embouchure océanique (contribution de l'Amazone et de tous ses affluents en aval d'Óbidos) par la technologie de l'Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), complètement novatrice à l'époque. Les premières campagnes de mesure directe du flux à l'embouchure concluent à des débits très variables au cours du cycle de marée, avec des pics supérieurs à 600 000 m³/s lors de la marée descendante (soit 60 % des apports fluviaux globaux à l'océan !), qui contrastent avec des flux nuls, voire négatifs (c'est-à-dire remontant vers l'amont de l'estuaire) quelques heures plus tard lors de la marée montante.

En 2005, le projet Amandes (Amazon-Andeans – IRD-CNRS) proposait d'étudier la connexion hydrologique et géochimique entre la chaîne andine, l'Amazone et l'océan Atlantique, en ciblant explicitement le continuum estuarien comme objet d'étude. Ce projet réunissait plusieurs disciplines,

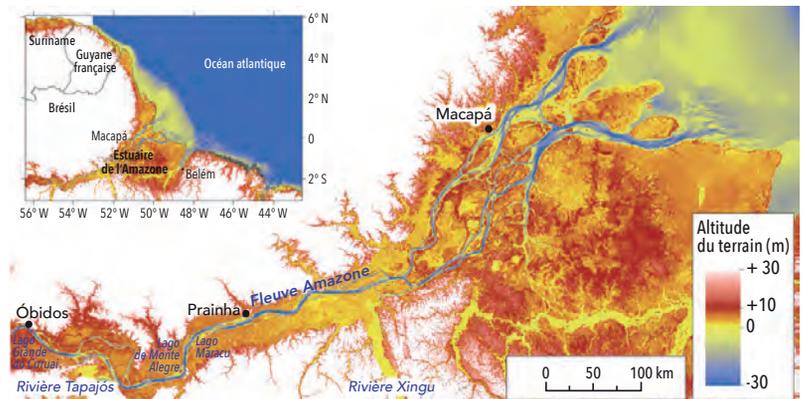
PARTENAIRES

Université de Brasília (UnB),
Brésil

Service géologique du Brésil
(SGB-CPRM)

donc la géochimie, l'hydrographie observationnelle *in situ* et la modélisation numérique de l'hydrodynamique (physique décrivant le mouvement des liquides). La double spécificité du projet Amandes consistait, d'une part, à s'appuyer fortement sur les outils de la géochimie isotopique (l'analyse du comportement d'un certain nombre d'éléments présents à l'état de traces, comme les terres rares – néodyme, et radium par exemple – permet de comprendre le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire) et, d'autre part, à utiliser une approche couplée entre l'hydrodynamique estuarienne et la géochimie marine basée sur une modélisation hydrodynamique originale de l'estuaire.

Ainsi, sur la base d'un réseau de stations marégraphiques s'étendant tout le long de l'estuaire et déployé pendant un cycle annuel entre 1998 et 1999, l'équipe de scientifiques a dressé une première typologie de la marée à l'embouchure de l'Amazone et de sa propagation jusqu'à la limite amont de l'estuaire, quelque 800 km à l'intérieur du continent. Premier constat : la marée océanique à l'embouchure de l'Amazone est ample, avec des marées – écart en mètres entre le point le plus haut et le point le plus bas de la mer lors d'une marée – qui atteignent 5 m lors des marées d'équinoxe. De telles amplitudes, si elles sont communes le long des côtes de l'Europe de l'Ouest, sont assez uniques à l'échelle des océans tropicaux. Fortes de cette énergie accumulée dans l'océan, les ondes de marée s'engouffrent sans difficulté dans l'estuaire de l'Amazone, en se propageant sur plusieurs centaines de kilomètres à contre-courant de la puissante décharge fluviale. En comparant les données acquises au cours des différentes saisons, les chercheurs impliqués dans le projet HyBAm parviennent à la conclusion que la capacité de la marée à remonter le cours de l'estuaire dépend fortement de la saison. En période de basses eaux, l'effet de la marée est sensible jusqu'à Óbidos, à 900 km en amont, alors qu'en période de crue, l'effet peut se constater jusqu'aux environs de Prainha, situé « seulement »



Carte topo-bathymétrique de l'estuaire de l'Amazone.

Les zones en jaune et bleu sont situées sous le niveau moyen de la mer; les zones en orange et rouge sont situées au-dessus. Le cours principal du fleuve et du delta terminal est visible en bleu. Ce travail, qui a combiné données spatiales, missions sur le terrain et digitalisation de cartes marines, est la première pierre pour la modélisation hydrodynamique de l'estuaire.

Source : FASSONI-ANDRADE A. C. et al. (2021).

à 600 km. Ces différences saisonnières de l'effet de la marée et donc de l'extension de l'estuaire résultent de la compétition entre l'énergie de l'eau du fleuve et celle de la marée.

Dans les années 2000, plusieurs initiatives de modélisation numérique hydrodynamique de l'estuaire de l'Amazone voient le jour parmi les partenaires de l'IRD au sein du projet HyBAm, notamment émanant de l'université fédérale de Rio de Janeiro et du CNRS. Ces modélisations, bien que relativement grossières dans la résolution de leurs grilles de calcul, ont permis d'établir une première cartographie de la propagation de la marée de l'océan Atlantique le long de l'estuaire de l'Amazone, et de son interaction avec la décharge d'eau douce fluviale.

Au cours du projet Amandes et de la décennie qui a suivi, la géochimie est apparue comme une discipline très complémentaire de l'hydrodynamique classique pour comprendre de façon intégrée le fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire amazonien. Les échanges entre l'état dissous et l'état de particules de certains éléments traces, comme le radium et le néodyme, se produisent à des vitesses différentes, et ces différentes vitesses peuvent être utilisées comme des chronomètres permettant de caractériser le temps de résidence des eaux de l'Amazone dans l'estuaire avant de rejoindre l'océan. Nous savons aujourd'hui que les eaux de l'estuaire sont exportées vers l'océan du large en 2 à 3 semaines seulement, indépendamment de la magnitude de la décharge fluviale.

Les recherches actuelles et les enjeux locaux

Par sa complexité, le système estuarien de l'Amazone reste encore peu connu. C'est une zone soumise à des aléas fréquents alors qu'un tiers de la population riveraine vit sous la menace directe des inondations récurrentes des berges de l'estuaire. En 2021, les crues historiques ont montré que ce risque est prégnant pour les trois grands centres urbains de l'estuaire que sont Belém, Macapá et Porto de Santana, durant la saison de la crue ou la saison sèche. L'urgence de comprendre ce risque de submersion pour la période actuelle, et de prédire son évolution à court/moyen terme, s'impose dans l'agenda de la recherche de l'IRD, dans un contexte où les transformations du bassin versant en amont s'accroissent, et où le niveau moyen de l'océan Atlantique augmente inexorablement sous l'effet du changement climatique. Ce besoin de production de connaissances sur le fonctionnement du système estuarien lors des événements extrêmes et sur son impact vis-à-vis des dynamiques socio-spatiales s'inscrit logiquement dans les Objectifs du développement durable des Nations unies. Les recherches menées actuellement sur l'hydrodynamique du système estuarien de l'Amazone s'inscrivent dans cette dynamique. À l'aube des années 2020, les chercheurs impliqués dans ce chantier d'étude bénéficient de l'héritage des trois décennies passées, en particulier des bases d'observations historiques. Mais l'enjeu actuel dépasse l'exploitation de ces seules bases de données, car elles demeurent parcellaires compte tenu de la taille de l'estuaire et de sa grande variabilité. Il faut donc relever le défi d'observations permettant d'accéder aux échelles spatiales et temporelles les plus fines, qui seules peuvent caractériser l'exposition des populations riveraines à l'aléa submersion. Cela nécessite d'établir l'état

de l'art de la modélisation numérique hydrodynamique sur le continuum estuarien du bas Amazone, et d'exploiter la nouvelle constellation d'imageurs spatiaux constituée par la famille des satellites Sentinel de l'Agence spatiale européenne. Ces nouvelles données, mises à la disposition de l'ensemble de la communauté scientifique internationale via l'*European Open Science Cloud*, ont vocation à nourrir un futur système de prévision opérationnelle de l'aléa submersion sur l'ensemble de l'estuaire amazonien, souhaité par la société civile de la région. La communauté scientifique – au cœur de laquelle se placent l'IRD et son réseau de partenaires au Brésil et en Europe – se doit de le mettre sur pied durant l'actuelle décennie. Dans un contexte où les populations riveraines dépendent du fleuve comme moyen de transport et de subsistance, un tel système opérationnel est incontournable pour orienter efficacement les politiques publiques au niveau local, avec la nécessaire question de l'adaptation dans un contexte où les changements climatiques, qui ont largement modifié le système estuarien, vont vraisemblablement s'accélérer.

Enjeux globaux

Les flux d'eau douce et de sédiments véhiculés par le système estuarien jusqu'à son débouché dans l'océan Atlantique équatorial ont une influence sur la circulation océanique et le système climatique. À l'échelle régionale tout d'abord, le panache – les eaux douces et turbides provenant de l'Amazone, qui se distinguent de l'eau de l'océan sur une très grande distance – de l'Amazone, par la quantité d'eau douce colossale qu'il apporte à l'océan superficiel, est à même d'altérer significativement les échanges de chaleur entre l'océan Atlantique et l'atmosphère tropicale, et par là même de modifier le climat de l'ensemble du bassin de l'Ouest Atlantique et des continents adjacents. Il participe à la variabilité du niveau de la mer le long des côtes des Guyanes et jusqu'aux Antilles, territoires exposés massivement à l'aléa cyclonique et pour lesquels chaque centimètre supplémentaire du niveau de la mer compte. Le panache lui-même, dans son extension de plusieurs milliers de kilomètres depuis l'embouchure jusqu'au centre du bassin Atlantique, semble contribuer à l'intensification des cyclones tropicaux qui se forment au large, lorsque ceux-ci traversent son cours. Enfin, aux échelles de temps décennales à centennales, l'eau douce charriée à travers l'estuaire de l'Amazone et redistribuée dans l'ensemble du bassin de l'Atlantique Nord par la circulation générale océanique a un rôle avéré sur le climat des régions tempérées d'Europe de l'Ouest et d'Amérique du Nord. Sans le panache d'eau douce de l'Amazone, l'Atlantique Nord verrait naître nettement moins de dépressions – ce qui conduirait notamment à un réchauffement sensible de toute l'Europe du Sud et de l'Afrique du Nord – et au contraire à un refroidissement du climat des États-Unis. De même, l'impact à long terme de l'apport des nutriments amazoniens sur les cycles biogéochimiques de l'océan Atlantique, et notamment sur la pompe biologique du carbone, demeure très mal connu. Les soubresauts et les événements extrêmes récents du débit de l'Amazone appellent donc une surveillance et une compréhension de cette variabilité sur le long terme jusqu'aux régions tempérées situées aux confins du bassin Atlantique, afin de les inclure dans les modèles de prédiction climatique.



Boue des Andes transportée par l'Amazone (nasa.gov).

L'image en couleur naturelle met en évidence le delta et l'estuaire de l'Amazone tels qu'ils ont été observés par le spectroradiomètre imageur à moyenne résolution (Modis) du satellite Terra de la Nasa le 29 juillet 2020.

Pour en savoir plus

FASSONI-ANDRADE A. C. *et al.*, 2021 – Comprehensive bathymetry and intertidal topography of the Amazon estuary. *Earth Syst. Sci. Data*, 13 : 2275-2291. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2275-2021>

GALLO M. N., VINZON S. B., 2005 – Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dyn.*, 55 : 441-448. <http://doi.org/10.1007/s10236-005->

KOSUTH P. *et al.*, 2009 – Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrol. Process.*, 23 : 3141-3150. <https://doi.org/10.1002/hyp.7387>

LÉON M. *et al.*, 2022 – Use of ²²³Ra and ²²⁴Ra as chronometers to estimate the residence time of Amazon waters on the Brazilian continental shelf. *Limnol. Oceanogr.*, <https://doi.org/10.1002/lno.12010>

Ont participé aux recherches

Fabien Durand (IRD), Alice César Fassoni Andrade (UnB), Patrick Seyler (IRD), Daniel Moreira (SGB-CPRM), Pieter van Beek (université de Toulouse), Pascal Kosuth (détachement IRD), Jacques Callède (IRD), Alain Laraque (IRD), Florent Lyard (CNRS), Yoann Le Bars (doctorant).

Le système côtier amazonien

Le comportement géomorphologique des rivages amazoniens, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation aux changements côtiers des zones humides au sens large et des mangroves en particulier sont un enjeu fort pour les gestionnaires et les acteurs du développement, et le seront encore davantage dans les décennies à venir.

PARTENAIRES

Institut de recherches scientifiques et techniques de l'État d'Amapá (IEPA), Brésil

Université fédérale du Pará (UFPA), Brésil

Secrétariat d'État aux ressources naturelles (Sema), Brésil

Université fédérale de l'Amapá (Unifap), Brésil

Agence de développement de l'État de l'Amapá (Adap), Brésil

Agence de la biodiversité de l'Amapá (ICMBio), Brésil

Parc national du cap Orange, Brésil

Agence de la pêche de l'Amapá (Pescap), Brésil

Représentation du ministère de la Pêche en Amapá, Brésil

Musée Emilio Goeldi (MPEG), Brésil

Secrétariat d'État aux ressources naturelles (Sectam), Brésil

Le système côtier amazonien : un littoral sous l'influence du grand fleuve

L'Amazonie est internationalement reconnue pour la complexité, la richesse et la diversité de son système hydrologique et de ses forêts, qui sont l'objet de très nombreux programmes internationaux de recherche et de surveillance environnementale. En revanche, l'espace littoral et le système côtier amazoniens sont moins étudiés, alors qu'ils hébergent une mosaïque d'écosystèmes de grande valeur écologique et patrimoniale avec de vastes forêts de mangroves, de nombreuses zones humides, des marais et des savanes inondables, les estuaires des fleuves drainant au nord le massif du plateau des Guyanes et au sud la basse plaine amazonienne du Pará.

Deux remarquables systèmes côtiers se déploient de part et d'autre de l'embouchure de l'Amazone : vers le nord, une côte soumise à des marées de faible amplitude, dominée par le poids des eaux et des sédiments argilo-limoneux du grand fleuve, plaqués à la côte par un courant Atlantique Sud très puissant qui remonte jusqu'aux Caraïbes ; vers le sud, une côte très dentelée par de nombreux estuaires, soumise aux macro-marées atlantiques et alimentée de sables fins formant des plages encadrées de dunes et de lagunes.

Pour comprendre comment fonctionnent et évoluent ces environnements côtiers, de nombreuses recherches sont conduites par l'IRD et ses partenaires depuis les années 1990. Les questions scientifiques portent sur la nature, l'intensité et les tendances des forces motrices qui façonnent ces systèmes à l'échelle régionale ; sur les dynamiques qui agissent localement et sur leurs éventuelles évolutions ou transformations ; sur la modélisation de leur fonctionnement, pour établir des diagnostics, des *scenarii* ou des recommandations face aux changements climatiques et environnementaux.



Érosion des mangroves par la houle, Guyane française.

En parallèle, de nombreuses recherches portent sur la grande richesse et la diversité biologique de ces écosystèmes côtiers, ainsi que sur leur vulnérabilité ou leur résilience aux impacts engendrés par les activités humaines. En Amazonie comme ailleurs, ces écosystèmes sont soumis à des perturbations causées par l'homme, c'est-à-dire l'altération ou la destruction des milieux (croissance urbaine, agriculture, tourisme, activités portuaires...), la pêche artisanale et industrielle, les prélèvements de ressources naturelles, les pollutions et les conséquences potentielles du développement de l'industrie pétrolière, à la suite de la découverte de gisements au large de l'embouchure de l'Amazone et du plateau des Guyanes. Si la population établie sur le littoral est, en nombre d'habitants, majoritairement urbaine (centres urbains, villes et métropoles), de très nombreuses communautés locales établies sur la côte dépendent de ses ressources naturelles pour assurer leur subsistance et leur développement.

Les enjeux scientifiques associés aux espaces littoraux amazoniens sont donc forts, tant du point de vue de la modélisation des dynamiques de l'interface continent/océan que de celui de la connaissance des écosystèmes et des déterminants de la coviabilité entre dynamiques naturelles et activités humaines.

PARTENAIRES

Institut national de recherches spatiales (INPE), Brésil

Agence d'agronomie Amazonie orientale (Embrapa), Brésil

Université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra), Brésil

Université fédérale du Maranhão (UFMA), Brésil

Université fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ), Brésil

Ifremer, France

CNRS, France

Université de la Guyane, France

L'espace, lieu privilégié d'observation du littoral

Au cours des dernières décennies, l'IRD a mené des programmes de recherche internationaux afin de mieux comprendre le système côtier amazonien, en alliant l'exploitation scientifique de données satellitaires et de mesures à des observations ou des enquêtes de terrain.

Le recours aux données satellitaires d'observation de la Terre est très bien adapté à l'étude de l'Amazonie, de par son ampleur, l'extension géographique du système côtier, la difficulté générale à accéder à l'espace littoral et le faible relief qui facilite l'analyse d'empreintes laissées dans les paysages. Après un traitement mathématique complexe, les images satellitaires d'observation de la Terre restituent certaines propriétés physiques des surfaces terrestres enregistrées dans les différentes longueurs d'onde de la lumière solaire qu'elles réfléchissent (satellites optiques). Certains satellites (radar) envoient leurs propres ondes sur la Terre afin de mesurer d'autres propriétés lorsque ces ondes réfléchies par les surfaces sont enregistrées par le capteur.

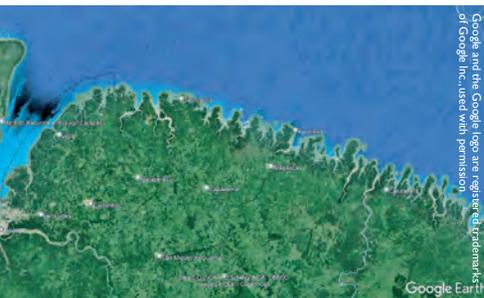
Dans un premier temps, ces propriétés permettent d'émettre des hypothèses et d'ouvrir des pistes de travail. Ensuite, elles amènent à produire des nouvelles connaissances via l'extraction d'information utile (classification, distribution spatiale et évolution dans le temps des écosystèmes ; modélisation 3 D ; indicateurs d'état des surfaces). Dans les domaines pour lesquels l'imagerie spatiale ne permet pas de discerner directement les objets ou les processus recherchés, des travaux méthodologiques produisent des indicateurs indirects en liant l'objet recherché à un objet identifiable dans l'imagerie.

Que ce soit en complément, en combinaison ou indépendamment de l'usage de données satellitaires, le recueil de données de terrain alimente la plupart des travaux de recherche.

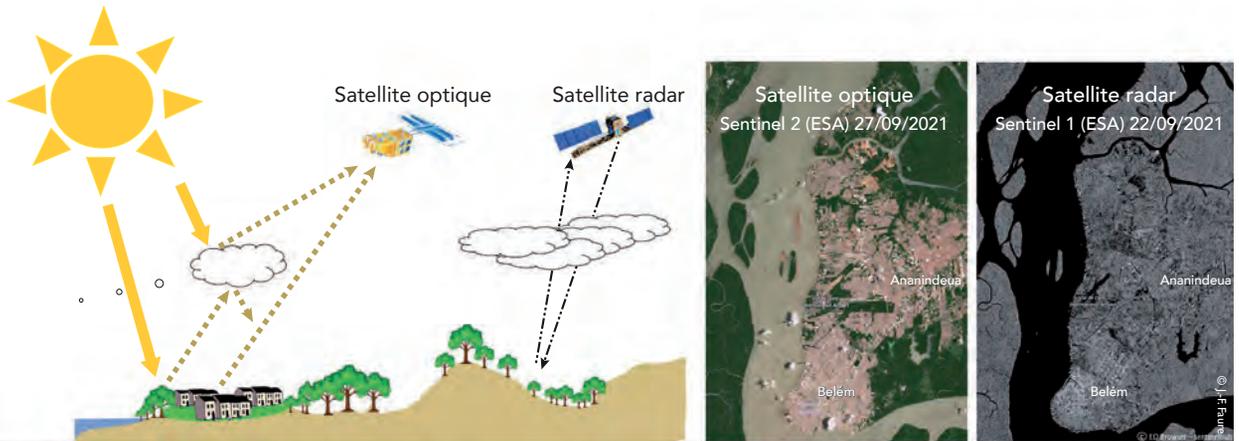
Concernant la préparation et l'organisation des campagnes de terrain, les chercheurs s'appuient là encore sur les images satellitaires pour la visualisation et la pré-cartographie des zones d'étude, pour la stratification des échantillonnages dans l'espace ainsi que pour les circuits et parcours des collectes. Certaines d'entre elles sont sélectionnées pour servir en retour à l'entraînement de calculs complexes appliqués aux données satellitaires, ou bien, dans de nombreuses situations, à la calibration des modèles, à la validation ou l'infirmité des hypothèses initiales, à la documentation de tendances ou la formulation de recommandations. Dans la plupart des programmes scientifiques, les missions de terrain permettent de coupler les informations satellitaires obtenues avec des prélèvements ou des inventaires (faune, flore, sédiments, eaux de mangroves ou à la côte...) ou encore avec des mesures issues de dispositifs de surveillance (paramètres météorologiques, compacité ou mouvements de bancs de vases...). Pour certaines études telles que celles liées aux activités de pêche, des relevés de captures aux points de débarquement sont réalisés, ainsi que des enquêtes auprès des pêcheurs eux-mêmes (parcours de pêche, trajectoires de migration des pêcheurs, pratiques de pêche...).



Amazone estuaire Nord.



Amazone estuaire Sud.



Différences entre capteur optique et radar.

Aperçu de 30 années de programmes de coopération scientifique

La position du littoral amazonien à l'interface continent/océan est essentielle à la compréhension du fonctionnement des biomes amazoniens, tant à l'échelle globale et régionale que locale.

À l'échelle globale, l'embouchure du fleuve combinée aux forçages régionaux qui s'y imposent provoque une dispersion des eaux et des sédiments amazoniens à grande échelle sur l'ensemble de la façade Atlantique, de la pointe est du Brésil au golfe des Caraïbes. Entre Macapá et Belém, l'embouchure large de 300 km amène à l'océan une charge sédimentaire estimée à 40 t.s^{-1} , qui en fonction des saisons et des estimations représente 2 à 6 milliards de tonnes par an (voir chapitre 8). Ces sédiments fins se déposent pour partie sur la plateforme continentale jusqu'à 200 km au large, et pour partie migrent le long des côtes nord-brésiliennes, du plateau des Guyanes jusqu'au Venezuela, sous l'effet combiné des courants océaniques et météorologiques (courant Atlantique Sud et Front intertropical de convergence). L'estuaire est constitué d'un chapelet d'innombrables îles (archipel de Marajó) et la quasi-totalité des sédiments qui remontent vers le nord alimente de vastes plaines de marées et fluviales, qui favorisent les zones humides et marécageuses. Cette masse de sédiments occulte largement les apports des autres fleuves du système côtier et conditionne une mosaïque d'écosystèmes comme la mangrove, qui se développe sur de très grandes surfaces de la zone intertidale. Les fortes précipitations et la richesse en nutriments induisent un foisonnement de biodiversité et une grande richesse floristique et faunistique, tant dans les milieux terrestres qu'aquatiques ou océaniques.

L'influence de l'Amazonie crée donc trois blocs distincts : le sud de l'estuaire (Pará/Maranhão) ; au nord, la marge équatoriale représentée par l'État de l'Amapá ; et, dans sa succession, le plateau des Guyanes. Chacun de ces ensembles fonctionne différemment et présente des caractéristiques qui lui sont propres. Le bloc Pará/Maranhão est composé de nombreux fleuves dont les estuaires coupent le plateau continental en formant des indentations, avec la formation des systèmes dunaires remarquables (ex. : Salinas) sur la façade océanique. Ces morphologies sont perpétuellement modifiées par les macro-

marées, qui façonnent d'immenses plages entrecoupées de forêts mixtes de mangroves occupant les flancs estuariens en bordure du bas plateau. En Amapá, la côte forme une vaste plaine vaseuse à marées macrotidales avec peu de fleuves, mais abritant des lacs et des marais et, le long du trait de côte, une frange quasi continue de mangroves, qui peuvent également occuper les caps boueux, les bords de lacs, les chenaux de marées ou les barres tidales. Elle borde la plateforme continentale, qui y est particulièrement étendue (1 62 000 km²), large et plane, avec en surface des eaux turbides et riches en argiles et en sables très fins. Passé le cap Orange, le troisième bloc, celui du plateau des Guyanes, présente une morphologie côtière plus étroite, formée d'une frange holocène récente et composée de mangroves, de zones humides et de marécages ; puis, en arrière, une plaine pléistocène plus ancienne qui est le domaine des savanes ou *prípris*. L'espace littoral est sous l'emprise de dynamiques hydro-sédimentaires très intenses, qui remodelent en permanence des bancs de dépôts vaseux (jusqu'à 60 km de long, 15 km de transect et 7 m d'épaisseur) qui se déplacent le long de la côte et sur lesquels les mangroves se développent. Lors de périodes entre la formation des bancs, le trait de côte débarrassé des mangroves est soumis à une forte érosion qui provoque la destruction d'habitats naturels et d'habitations humaines. Ici, la variation de l'extension des mangroves serait liée à des macro-modifications de basse fréquence dans l'océan, sous l'impulsion de l'oscillation nord-atlantique (phénomène de variation du régime océano-atmosphérique en fonction des pressions atmosphériques, ONA). D'autres recherches émettent l'hypothèse de l'influence sur la houle du cycle lunaire Saros (période de 18 ans et 11 jours correspondant au temps écoulé entre deux apparitions identiques de la Lune dans le ciel), qui pourrait expliquer un cycle dans la dynamique spatio-temporelle des bancs de vase et de la mangrove qui les colonise.

Dans ce contexte, le comportement géomorphologique des rivages amazoniens, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation aux changements côtiers des zones humides au sens large et des mangroves en particulier deviennent un enjeu fort pour les gestionnaires et les acteurs du développement des décennies à venir. Ces écosystèmes littoraux sont fortement menacés par l'homme, en témoigne l'extension des mangroves, réduite de 25 % à l'échelle globale alors qu'elles diminuent les effets côtiers. De ce fait, ces derniers se répercutent avec plus d'intensité, d'amplitude et de régularité sur les rivages. De plus, ces écosystèmes sont exposés aux effets des changements globaux avec l'élévation du niveau de la mer, la modification de la température de la surface des océans, l'accroissement de l'érosion des rivages, l'aggravation des tempêtes océaniques... Si l'hypothèse actuellement retenue est que le littoral amazonien présenterait un plus faible degré de vulnérabilité à ces effets que d'autres régions du monde, il n'en demeure pas moins que la prise de mesures de préservation et de conservation ressort comme une urgence de première importance.

L'interdisciplinarité, mot-clé des études côtières amazoniennes

L'interdépendance entre systèmes continentaux, côtiers et océaniques impose aux études consacrées aux écosystèmes littoraux de déployer des approches interdisciplinaires incluant l'hydrologie, la sédimentologie, la géo-



Mangroves le long du littoral guyanais.

morphologie, la géologie, la botanique, la zoologie, l'océanographie... L'hétérogénéité des populations et de leur occupation de ces espaces – densités et tissus urbains, cultures et relations à l'environnement, ressorts et pratiques de développement – amène les communautés scientifiques à inclure des dimensions sociologiques, anthropologiques ou économiques aux études côtières.

Les programmes menés par ou avec l'IRD au cours des trente dernières années, dont nous avons rapporté quelques résultats marquants dans le paragraphe précédent, ont généralement abordé l'ensemble de ces volets. Les recherches côtières amazoniennes ont mobilisé des partenariats larges, réunissant différents intervenants de l'IRD, mais aussi de nombreux établissements de recherche ou d'enseignement supérieur au Brésil.

Articulés aux projets scientifiques portés par ces organismes, les programmes Ecolab, Proclam ou Guyamapa ont agrégé un dense réseau de chercheurs couvrant toutes les thématiques d'intérêt pour les études côtières, du Venezuela au Nordeste brésilien. De nombreuses thèses de doctorat et des formations universitaires ciblées sur les problématiques côtières ont consolidé et enrichi le réseau dans tous les compartiments scientifiques d'intérêt : dynamiques hydro-sédimentaires et géomorphologie littorale, paléoclimats et évolutions climatiques, écologie, écobotanique et biodiversité, ressources littorales, pratiques et usages. En lien avec ces programmes fédérateurs, les nombreuses équipes impliquées ont animé une recherche transversale ouverte à la société, associant chercheurs, acteurs des politiques publiques et organismes gestionnaires de l'environnement.

Aujourd'hui, ce réseau perdure dans le cadre de programmes de coopération scientifique voués à d'autres domaines de recherche, comme le projet international Progsyat en cours d'exécution qui, même s'il ne contient pas de volet spécifiquement consacré au système côtier, mobilise autour de la thématique des mangroves des côtes guyanaises. L'un des objectifs de Progsyat, piloté par l'IRD depuis la Guyane jusqu'à fin 2023, est de remobiliser le réseau historique de chercheurs engagés dans les études côtières amazoniennes autour d'une nouvelle proposition pour la période 2023-2026. Cette proposition sera articulée aux programmes de recherche d'intérêt connexe portés par l'IRD au Brésil, et engagera une communauté scientifique élargie à reprendre les travaux dans une démarche interdisciplinaire renforcée, répondant aux objectifs de la science de la durabilité, impliquée et ouverte, fixés par l'Institut

Perspectives et orientations pour aller plus loin

Les études consacrées au système et aux fleuves côtiers amènent leurs auteurs à identifier et à préconiser des mesures concrètes visant la préservation, la protection ou l'aménagement du littoral dans l'objectif de construire une coviabilité durable entre systèmes naturels et systèmes anthropisés.

Cette finalité de la recherche est fortement attendue par la société, et répond à une urgence dans le contexte du changement climatique en cours. Les menaces pesant sur les ressources naturelles, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, se diversifient et s'intensifient, et les notions de vulnérabilité et de résilience des écosystèmes littoraux prennent aujourd'hui



Vendeur de crabes de mangrove, marché de Bragança au sud de l'embouchure de l'Amazone (Pará, Brésil).

une dimension particulière. Pour les sociétés qui dépendent de ces écosystèmes pour leur subsistance et leur développement, ou pour les habitants des centres urbains de la façade océanique, ces menaces mettent en péril les modes de vie et, dans certains cas, la possibilité, à terme, de l'occupation humaine sur les zones sensibles du littoral.

Le système côtier de l'Amazonie n'échappe pas aux situations que connaissent les autres espaces littoraux. Même si sa situation géographique de part et d'autre de l'équateur (Macapá, État de l'Amapá) le préserve des ouragans, il reste exposé aux perturbations qui affectent un très grand nombre de côtes de par le monde. Ces perturbations se matérialisent par l'érosion du trait de côte et le recul de zones habitables, ou par des inondations à l'occasion d'événements météorologiques violents. Elles induisent une raréfaction de la ressource halieutique et un accroissement de la pression anthropique sur les milieux côtiers lié à la croissance de la population, à la consommation des terres, à l'aquaculture, à l'agriculture. Pour y faire face, les recherches fondamentales doivent être soutenues afin d'améliorer les modèles prédictifs et les activités de recherche doivent permettre aux décideurs et à la société d'expérimenter des solutions de réduction des impacts des perturbations.

Il s'agit de repenser l'empreinte humaine sur les ressources et d'accompagner les populations avec des solutions qui placent la coviabilité au cœur des interactions entre systèmes naturels et sociétés, en termes de conservation, de protection et de valorisation des services écosystémiques. Les futures études s'appuieront sur le réseau d'aires protégées qui existe aujourd'hui en Guyane (parcs nationaux littoraux, parcs nationaux ou zones de protection marines, réserves de biosphère, zones de protection environnementale, réserves extractivistes, sites européens de protection des zones humides) pour expérimenter ou identifier des pistes d'adaptation à ces défis.

Les questionnements scientifiques qui sous-tendent ces études s'inscriront dans la continuité des travaux antérieurs, en articulant les avancées obtenues dans le domaine de la modélisation des forçages hydrologiques, océanographiques et climatiques aux échelles régionales avec des avancées obtenues aux échelles locales, en liant les dynamiques des écosystèmes et les dynamiques des relations ressources/usages. Pour atteindre ces objectifs, de nouvelles approches méthodologiques devront venir renforcer les outils et les pratiques actuelles des communautés scientifiques.

Les progrès réalisés dans le domaine de l'observation de la Terre sont constants, avec de nombreuses missions satellitaires nouvelles offrant des gisements de jeux de données toujours plus divers et massifs, notamment l'amélioration des résolutions spatiales et des fréquences de prises de vues, les nouvelles bandes spectrales renseignant sur l'état des surfaces naturelles, les missions consacrées au rayonnement thermique, les nouveaux radars permettant d'approcher plus finement la biomasse ou l'humidité de sols. Ces progrès de l'observation spatiale sont aujourd'hui complétés par la démocratisation de l'usage de moyens aéroportés d'observation tels que les drones.

En parallèle, les progrès de l'ingénierie informatique et de la science de la donnée permettent aujourd'hui de mobiliser ou d'expérimenter des

méthodes d'intelligence artificielle et de fouille de jeux massifs de données hétérogènes particulièrement prometteurs et actuellement en plein essor. Appliquées aux problématiques côtières, ces nouvelles capacités devraient permettre d'améliorer la qualité des modèles et d'imaginer de nouvelles analyses et combinaisons des données collectées depuis l'espace et sur le terrain.

Enfin, la forte croissance des outils collaboratifs et participatifs observée depuis quelques années avec la généralisation d'Internet et des réseaux sociaux ouvre des pistes de réflexion et de travail pour imaginer de nouvelles formes d'interaction entre la recherche et les populations concernées sur les systèmes côtiers.

Pour en savoir plus

PROST M. T. R. C. *et al.*, 2017 – *L'embouchure de l'Amazone, macro-frontière géomorphologique : enseignements de 30 années de recherches franco-brésiliennes sur les systèmes côtiers amazoniens (1^{re} partie)*. *Confins* [En ligne], 33. <http://journals.openedition.org/confins/12568> ; DOI : 10.4000/confins.12568

PROST M. T. R. C. *et al.*, 2018 – *L'embouchure de l'Amazone, macro-frontière géomorphologique : enseignements de 30 années de recherches franco-brésiliennes sur les systèmes côtiers amazoniens (2^e partie)*. *Confins*, 34. <http://journals.openedition.org/confins/12830> ; DOI : 10.4000/confins.12830

Ont participé aux recherches

Jean-François Faure (IRD), Maria Teresa Prost (MPEG), Christophe Charron (IRD), Valdenira Ferreira Santos (IEPA), Antoine Gardel (CNRS), Amilcar Carvalho Mendes (MPEG), Heloisa Vargas Borges (MPEG), Erwan Gensac (université Bretagne Sud), Jean Michel Martinez (IRD), Vincent Vantrepotte (CNRS), Edward Anthony (université Aix-Marseille).

Les processus physiques à l'embouchure de l'Amazone

La campagne Amazomix est la première campagne multidisciplinaire menée face au plateau amazonien. Elle a été conçue pour répondre aux très nombreuses questions qui se posent sur les processus physiques et biogéochimiques et sur leurs impacts sur l'ensemble de l'écosystème marin du plateau continental situé en face de l'embouchure de l'Amazone.

PARTENAIRES

Centre national de la recherche scientifique (CNRS), France

Centre national d'études spatiales (Cnes), France

Université fédérale rurale du Pernambouc (UFRPE), Brésil

Université fédérale du Pernambouc (UFPE), Brésil

Université fédérale du Pará (UFPA), Brésil

Université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra), Brésil

Université fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ), Brésil

Institut national de recherche spatiale (INPE), Brésil

Université de Porto, Portugal

Rockland Scientific, Canada

Le fleuve Amazone apporte une charge considérable d'eau, de sédiments et d'organismes à l'océan Atlantique, mais son embouchure est peu étudiée (voir chapitre 8) et de nombreux aspects de son fonctionnement restent à découvrir. Le plateau continental amazonien connaît une variété de processus physiques tels que les apports fluviaux, les courants côtiers, la variabilité de méso-échelle, tourbillons ou filaments, l'upwelling (courant puissant du fond vers la surface, réputé pour générer des eaux riches en nutriments, donc favorables à la pêche), ou encore la marée et ses ondes de marée internes – se propageant à la fréquence de la marée et créées par l'interaction du courant de marée avec une topographie abrupte dans un océan à plusieurs couches de densité différente – ou même toutes sortes d'ondes internes dues au vent ou aux courants. L'ensemble de ces processus joue un rôle clé dans la machine climatique, influence la concentration en nutriments, en chlorophylle et en matières en suspension, et modifie les équilibres énergétiques, halins et thermiques. Ces paramètres conditionnent à leur tour les interactions entre le milieu physique et le milieu vivant, des bactéries au plancton et aux stocks de poissons.

Le panache dessalé de l'Amazone ou plume est un grand volume d'eau douce, turbide et riche en nutriments d'origine continentale qui est amené sur la bande côtière. C'est un site de forte production de phytoplancton qui a des effets bénéfiques sur toute la chaîne alimentaire. Il pénètre dans un important couloir de circulation océanique et dans le « tapis roulant de l'océan », entraîné par les vents, la température et la salinité. L'eau chaude et salée se déplace vers le nord, où elle se refroidit. Cette eau plus froide et plus dense coule au fond des océans et retourne vers le sud. Cette circulation



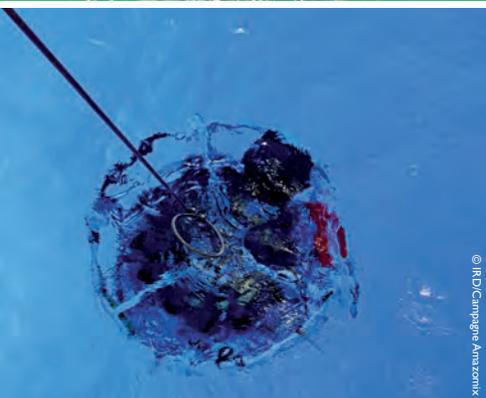
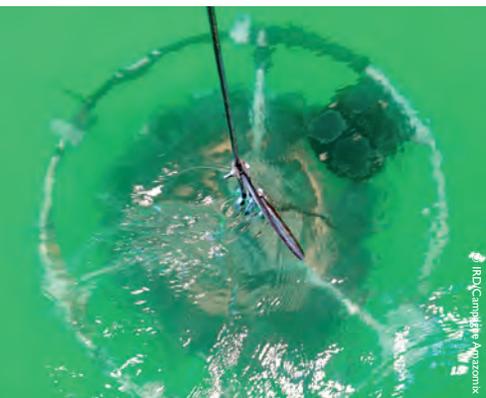
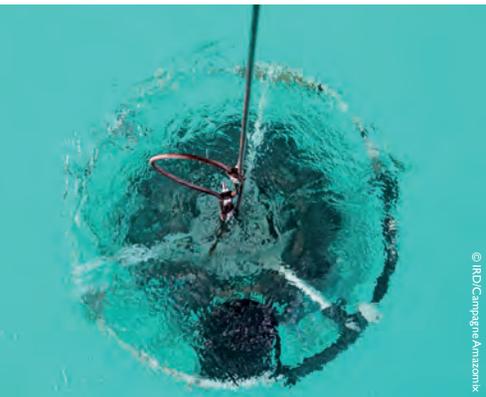
Débarquement d'échantillons biologiques, campagne Amazomix, Brésil.

En conformité avec les accords internationaux et la législation brésilienne, les échantillons biologiques recueillis lors de la campagne Amazomix ont été débarqués au Brésil, pays où ils ont été prélevés. On voit ici l'équipage s'activer pour passer les échantillons depuis l'Antea vers le bateau de pêche en pleine mer. De là, ils ont été acheminés à l'université fédérale du Pará, partenaire de l'IRD.

méridienne de retournement de l'Atlantique (*Atlantic Meridional Overturning Circulation, Amoc*) est cruciale pour la régulation du climat mondial et s'avère être l'une des raisons pour lesquelles les températures sont plus élevées le long des côtes européennes qu'en Amérique du Nord.

Les marées internes sont particulièrement énergiques dans cette région. Par leurs mouvements verticaux importants ou le mélange turbulent qu'elles peuvent créer, elles ont un impact sur les cycles biogéochimiques, permettant un apport important de nutriments dans la couche euphotique – qui est la couche supérieure de l'écosystème océanique –, favorisant la production primaire, comme observé en surface à partir de données satellitaires. Ainsi, les marées internes pourraient influencer la pompe biologique et le cycle du carbone.

La biodiversité marine globale de la région, des bactéries aux poissons, n'est pas bien décrite. La présence de récifs coralliens malgré les eaux turbides n'est pas expliquée. La connectivité des espèces dans l'Atlantique tropical



Mise à l'eau d'une rosette, campagne océanographique Amazomix.

Une rosette est un instrument océanographique doté de bouteilles d'échantillonnage qui recueillent de l'eau à des profondeurs sélectionnées, grâce à un système qui actionne leur ouverture depuis le navire. Ici, on voit l'instrument lâché trois fois dans le même océan, bien que sa couleur varie fortement.

reste également une question ouverte. La région des Caraïbes est de loin plus riche en biodiversité que l'océan au large du Brésil. Une hypothèse est que le panache amazonien, qui peut s'étendre jusqu'à 3 000 km à l'extérieur de l'embouchure, pourrait agir comme une barrière pour certains organismes.

Le plateau amazonien constitue donc un laboratoire expérimental idéal pour étudier l'impact des processus physiques sur la structure et la fonction des écosystèmes marins, côtiers et océaniques.

La campagne Amazomix

Toutes ces questions ont amené les chercheurs de l'IRD et leurs partenaires à mener à la fin de l'année 2021 une campagne en mer de grande envergure, la campagne Amazomix. Une équipe pluridisciplinaire de 17 chercheurs français et brésiliens a embarqué à bord de l'*Antea*, un navire semi-submersible de la flotte océanographique française. Parti de Cayenne (Guyane française), le navire a navigué dans les eaux brésiliennes en explorant l'embouchure de l'Amazone sur plus de 6 000 km. Cette campagne a couvert le plateau amazonien et le talus continental pour étudier l'impact des courants à échelle fine, du panache amazonien et des processus turbulents (résultant des ondes internes qui se forment dans l'océan, ces mouvements de quelques millimètres par kilomètres provoquent un mélange irréversible des eaux et de leurs propriétés sur plusieurs milliers de kilomètres), sur le fonctionnement de l'écosystème marin d'un point de vue physique, biogéochimique et biologique. L'expédition visait également à retracer l'origine et la distribution des polluants, des métaux lourds et des microplastiques, et à déterminer leur rôle dans la chaîne alimentaire.

En plus des scientifiques embarqués, Amazomix comprend une équipe de 70 chercheurs du Brésil, de France et d'autres pays.

Les mesures ainsi que les analyses des prélèvements *in situ* seront étudiées en interaction avec les outils et données numériques (modélisation et données satellitaires). L'analyse des données collectées sera réalisée conjointement par les différents partenaires et les résultats seront partagés. La campagne aura également une fonction de formation à la recherche pour quelque 50 étudiants internationaux.

En conclusion

Les résultats préliminaires révèlent un fort impact des ondes internes sur la structure et le fonctionnement de l'écosystème marin, des processus physiques aux processus écologiques. Un échantillonnage biologique étendu des différents compartiments, depuis la surface jusqu'à plus de 1 300 m de profondeur, a révélé une biodiversité bien plus importante que celle enregistrée précédemment dans la région.



Tri des prélèvements biologiques avant conditionnement.

Pour en savoir plus

<https://www.ird.fr/campagne-amazomix-etude-des-processus-physiques-et-leurs-impacts-sur-lecosysteme-marin-lembouchure>

Ont participé aux recherches

Ariane Koch Larouy (IRD), Flavia Lucena Fredou (UFRPE), Moacyr Araujo (UFPE), Arnaud Bertrand (IRD) et plus de 70 chercheurs.

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 stalagmites), 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 CO₂ 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 Paleotracés, 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.

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.



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.

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 sedimentological records covering 30, 000 years BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168 : 221-235.[https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00256-X](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](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 Fraizyt (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/UF RJ), 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).

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 inexploitées. 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 climato-logiques 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 $0,25 \times 0,25$ 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

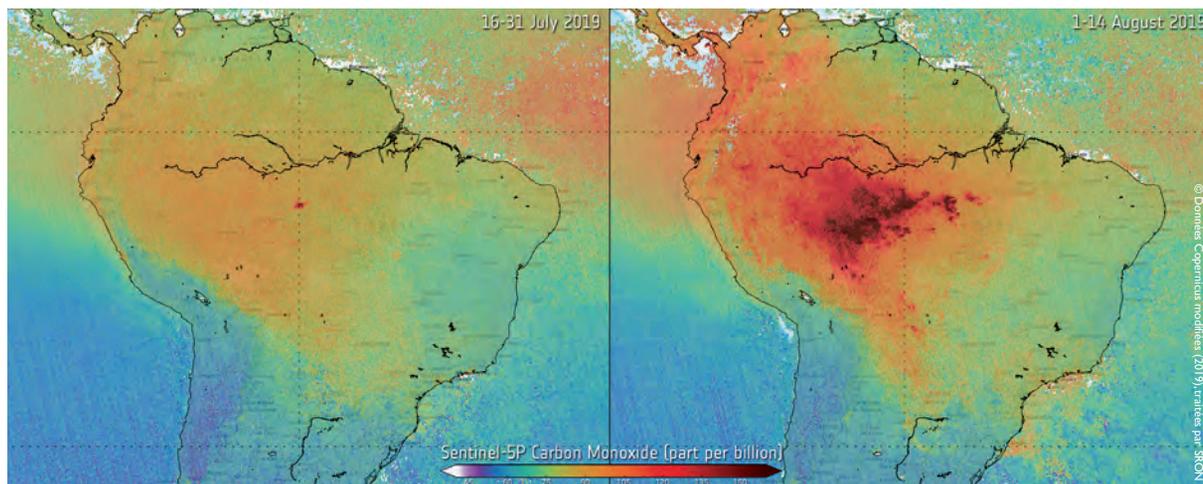
Pour comprendre les variations spatiales et temporelles des pluies, des ré-analyses issues des modèles météorologiques fournissent des informations détaillées sur l'état de l'atmosphère (pression, vent, etc.) à différents niveaux altitudinaux. Ensuite, d'autres enregistrements, qui renseignent plus spécifiquement 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



© IRD/L. Emperaire

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

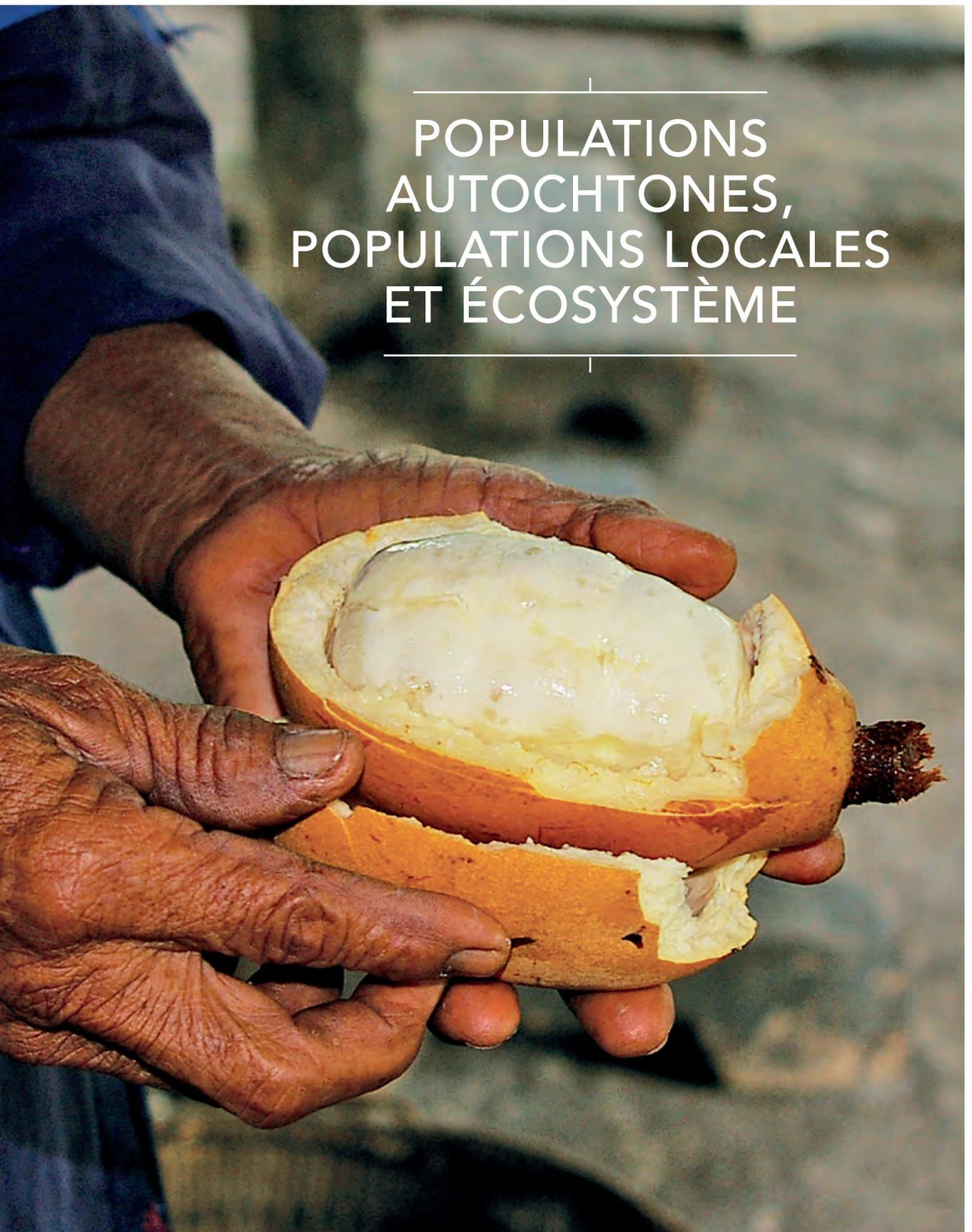
Josyane Ronchail (université Paris 7-Denis Diderot), Jhan Carlo Espinoza (IRD), Gérard Cochonneau (IRD), Jean-Loup Guyot (IRD), Michel Molinier (IRD), Valdemar Guimarães (ANA), Eurides de Oliveira (ANA), Naziano Filizola (Ufam), Juan-Julio Ordenez (Senamhi, Pérou), Luis Noriega (Senamhi, Pérou), Jorge 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 Grenobles-Alpes), Paola Andrea Arias (Groupe d'ingénierie et de gestion environnementale [Giga], université d'Antioquia, Medellin, Colombie), Laura Paccini (université de Virginie, États-Unis).

PARTIE 3

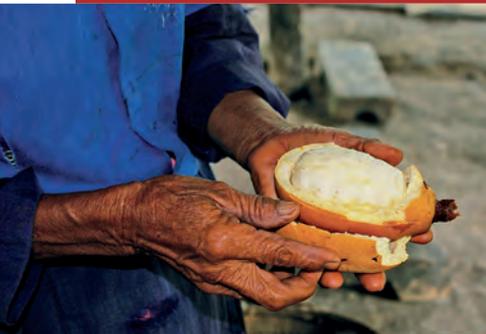
Cupuí, fruit de l'abattis
cultivé en Amazonie
brésilienne.



POPULATIONS
AUTOCHTONES,
POPULATIONS LOCALES
ET ÉCOSYSTÈME



PARTIE 3



L'Amazonie brésilienne, comme l'ensemble du bassin amazonien, est marquée par une très grande diversité culturelle : les peuples amérindiens et les communautés locales ont développé des modes de vie qui dépendent d'un large éventail de ressources naturelles et culturelles provenant de l'un des biomes les plus diversifiés de la planète. La région compte plus de 180 peuples autochtones, représentés par plus de 440 000 locuteurs de plus de 162 langues appartenant à 24 familles linguistiques, plus 12 langues isolées. Sur ces 162 langues, douze sont parlées par moins de 20 locuteurs. Les communautés locales sont également multiples, avec plus de 1 000 communautés quilombolas, avec les exploitants de l'hévéa et du *piassaba*, les cueilleurs de noix, casseurs de *babaçu*, pêcheurs, etc., chacune de ces communautés ayant son propre système d'utilisation des écosystèmes forestiers.

Longtemps considérée comme la dernière frontière de la colonisation, l'Amazonie brésilienne est le lieu de dynamiques sociales, culturelles et économiques complexes, qui se traduisent par une dégradation croissante de l'écosystème, de plus en plus sensible tant au niveau local qu'international. La région est également un espace de lutte pour la reconnaissance des territoires et des droits collectifs des peuples indigènes et des communautés locales. Des systèmes forestiers et agroproductifs non durables, comme l'agriculture et la pêche industrielles, la déforestation illégale, ou d'autres formes de dégradations environnementales, comme l'extraction minière, associés aux infrastructures comme les routes et les barrages sont en expansion rapide. Ils entraînent une concurrence territoriale et économique féroce avec une multiplicité d'autres systèmes productifs durables, tant traditionnels, ancrés dans le temps, que plus récents et qui se rattachent aux courants agroécologiques et agroforestiers, porteurs d'innovations socio-écologiques. L'Amazonie connaît également un processus d'urbanisation accélérée et non planifiée, qui crée des marchés et génère de nouvelles pressions sur les ressources forestières.

Depuis les premières études menées en 1983, l'IRD et ses partenaires se sont efforcés de comprendre ces enjeux sociaux, territoriaux et économiques en Amazonie. Aujourd'hui, leurs recherches sont de plus en plus axées sur la science de la durabilité. Ils promeuvent les approches interdisciplinaires, en co-construction avec les parties prenantes et avec la volonté de soutenir la mise en œuvre de politiques publiques qui permettent une coexistence non conflictuelle entre l'humain et la biodiversité, une gouvernance partagée de ce complexe forestier avec les populations locales et qui prennent en compte l'urgence de la situation.

13

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

Actuellement, ce n'est pas tant face aux changements climatiques que les habitants des *várzeas* se sentent démunis mais plutôt face aux activités minières ou au développement de la pêche industrielle, qui menacent leur territoire, leurs conditions d'existence et renforcent leur précarité.

Contexte

Au cours de la deuxième partie du XX^e siècle, sous l'impulsion d'énormes investissements publics pour le développement économique, l'Amazonie devient l'une des plus grandes régions agricoles du Brésil, productrice de céréales, de soja et de bovins. C'est aussi une région qui attire l'exploitation minière et qui offre un grand potentiel pour l'hydroélectricité. Ce développement se réalise aux dépens des écosystèmes forestiers et de la biodiversité, avec notamment des transformations importantes de la couverture et des usages des sols, une urbanisation rapide, mais dépourvue d'infrastructures d'assainissement, la construction de plusieurs ouvrages hydroélectriques de grande à petite envergure. Pour la majorité des 20 millions d'habitants, l'injustice sociale et la précarité augmentent. Les populations impliquées dans les activités rurales sont particulièrement exposées à ce nouveau contexte en raison de leur dépendance aux conditions hydro-climatiques et environnementales. L'influence de la déforestation sur le climat local fait certes encore débat, mais plusieurs changements dans la répartition saisonnière des pluies et sur les débits des fleuves et rivières sont observés dans les régions les plus déboisées d'Amazonie ; les populations se rendent compte également des changements, comme une augmentation de la température et une diminution de la brume matinale. Les dommages causés aux écosystèmes d'eau douce menacent leur sécurité alimentaire en réduisant la productivité piscicole, alors que la consommation de poisson des populations riveraines est la principale source de protéines animales. À ces pressions environnementales viennent s'ajouter les pressions socio-économiques exercées par les grandes entreprises agricoles, minières, etc. qui, au nom du progrès, accaparent les terres, obligeant les populations à migrer la plupart du temps vers la périphérie de grandes villes et devant lesquelles les populations se sentent démunies et abandonnées des pouvoirs publics.



Un pêcheur et son fils sur la várzea Grande de Curuaí.

Face à ce constat, les équipes franco-brésiliennes engagées de longue date dans des études environnementales ou sociales en Amazonie, en particulier au sein du laboratoire mixte international « Observatoire des changements environnementaux » (OCE) (IRD/UnB), mais également du dispositif de recherche et formation en partenariat (dP) Amazonie du Cirad, ont proposé de mettre en œuvre l'observatoire Odisseia (Observatoire des dynamiques socio-environnementales : durabilité et adaptation aux changements climatiques, environnementaux et démographiques), dont l'objectif principal est d'appuyer les populations les plus précaires dans leurs transitions socio-écologiques en renforçant leur capacité à réagir aux pressions environnementales et sociales.

Comment fait-on ?

Il est de plus en plus admis que face aux enjeux socio-environnementaux, l'important est de mieux diffuser, mieux valoriser et surtout mieux intégrer les connaissances produites dans la prise de décision. C'est autour du défi de la production de connaissances mobilisables dans les stratégies d'action territoriale des acteurs que les équipes franco-brésiliennes se sont mobilisées pour proposer l'observatoire Odisseia. Le format « observatoire », en s'inscrivant dans un temps de moyen à long terme, permettrait de conduire notre recherche selon un certain nombre de principes, d'élaborer un ou plusieurs cadres conceptuels et méthodologiques.

Le rapprochement de la science et de la société comme condition préalable à l'accompagnement des transformations motive depuis quelques années l'émergence d'observatoires dans lesquels le citoyen (ou la communauté), les décideurs et organisations de la société civile participent à la co-construction

PARTENAIRES

Université de Brasília,
Centre de développement durable
(UnB/CDS), Brésil

Institut national de recherches spatiales
(INPE), Brésil

Université fédérale de Rio de Janeiro
(UFRJ), Brésil

ONG Sapopema, Brésil

de connaissances et à la co-production de données pour les rendre plus facilement mobilisables dans les stratégies d'action. C'est dans cette mouvance que nous avons proposé le développement de l'observatoire Odisseia, dans lequel nous souhaitons tendre vers une recherche la plus inclusive possible, dans laquelle les acteurs définissent avec les chercheurs les objectifs, questionnent et participent à la collecte des données, à leur analyse et à la diffusion des résultats. Il s'agit d'établir une relation de confiance suffisamment forte pour limiter au maximum l'asymétrie entre les participants, et ainsi permettre l'intégration des savoirs locaux et académiques, ainsi que l'appropriation des données et des connaissances produites. Au sein de l'observatoire, notre posture n'est pas neutre, puisque nous sommes animés par l'idéal de justice socio-environnementale et que cela se transcrit dans le choix des acteurs avec lesquels nous souhaitons travailler et que nous souhaitons accompagner dans leurs stratégies d'action, mais nous restons dans l'impartialité en conservant des protocoles de recherche rigoureux.

Les travaux centrés sur le site pilote de Santarém illustrent les recherches menées au sein de l'observatoire. Elles visent deux groupes : d'une part, les populations riveraines des plaines inondables avec, pour cas d'étude, la *várzea* do Lago Grande de Curuaí, une vaste plaine inondable de la région de Santarém, dont les activités agricoles, d'élevage et de pêche sont perturbées par les changements climatiques et les pressions socio-économiques exercées par la pêche industrielle et les grandes exploitations bovines ; d'autre part, les agriculteurs familiaux de la région du Planalto de Santarém, confrontés dans leur quotidien à l'avancée du soja sur leur territoire.

Les populations rurales de Curuaí ont pour la plupart une poly-activité, avec la pratique de l'élevage, de la pêche et de l'agriculture. La pêche est essentielle pour subvenir aux besoins en protéines animales et se pratique de manière artisanale ou seulement pour subvenir aux besoins familiaux. L'agriculture, essentiellement du maraîchage et de la production de manioc, se pratique dans les levées de la plaine et la terre ferme adjacente. L'élevage extensif de bovins, dont l'essor date des années 1950, représente encore aujourd'hui environ 10 % de l'élevage dans l'État du Pará ; des formes plus intensives et économiquement plus rentables se développent sur des pâturages cultivés, principalement dans la région du sud-ouest de l'État. Les pâturages naturels des zones inondables présentent de bonnes caractéristiques nutritives, qui compensent partiellement la nécessité de déplacer le bétail sur la terre ferme en période de hautes eaux. Lors des deux dernières décennies, le pâturage naturel a été limité par la plus grande fréquence des crues de grande amplitude, ce qui conduit les éleveurs à ouvrir de nouveaux pâturages en terre ferme pour augmenter les réserves d'herbage. Nous avons engagé un processus de recherche visant à comprendre comment ces populations locales modifient leurs stratégies de vie face au changement climatique et aux conflits socio-environnementaux. Ainsi, nous cherchons à évaluer avec elles les stratégies d'adaptation et à débattre et rechercher des pratiques capables de minimiser les impacts environnementaux et de maximiser leur capacité de production des biens nécessaires à leur subsistance.

Nous avons dans un premier temps établi un partenariat avec le syndicat des agriculteurs de Santarém (STTR) et avec la Feage (Fédération des associa-



Petit élevage (cochons, poules, pintades...) pendant l'étiage, dans les plaines d'inondation du Lago do Curuaí.

tions de résidents et des communautés du projet d'établissement agro-extractiviste [PAE] Lago Grande), dont le président a accompagné nos activités. Le projet d'établissement agro-extractiviste du Lago Grande de Curuaí (PAE Lago Grande), créé en 2005 par l'Incra (Institut national de colonisation et de réforme agraire), couvre environ 290 000 ha, englobant une grande partie de cette région ; il regroupe 154 communautés, composées chacune de 10 à 100 familles. La Fédération des associations de résidents et des communautés du PAE Lago Grande (Feagle) a été créée comme forme d'organisation et de représentation sociale des communautés. Le STTR est quant à lui un syndicat particulièrement actif, qui représente environ 30 000 familles. Le PAE Lago Grande instaure une régulation collective des terres et de l'usage des ressources. Les lacs, les forêts et les pâturages naturels sont considérés comme une propriété commune par les résidents. De grandes exploitations bovines (*fazendas*) s'étendent cependant dans la zone : elles occupent la plaine inondable et s'étalent également dans la zone de terre ferme. Considérées comme des propriétés privées, elles empiètent largement sur le territoire des communautés. Malgré le statut légal du PAE Lago Grande, les droits associés au statut de propriété collective des terres ne sont toujours pas reconnus par certains résidents, ce qui rend encore plus complexe la résistance à de nombreuses pressions telles que la demande d'exploitation minière, l'agrobusiness, les activités de pêche industrielle, l'occupation désordonnée ou la déforestation.

Pour interagir avec les résidents, nous nous appuyons sur la modélisation d'accompagnement (*The Companion Modelling approach*, ComMod). Le développement du modèle est réalisé à travers la co-construction d'un jeu de rôle dans lequel les acteurs jouent leur propre rôle. Les règles du jeu (dynamique environnementale et sociale) intègrent les connaissances des chercheurs et celles des acteurs, ces dernières étant recueillies lors des entretiens, des activités participatives (cartographie, calendrier des activités agricoles et environnementales, entretiens, théâtre forum, etc.) et des débats qui accompagnent systématiquement les séances de jeu. Le processus de construction du jeu et les séances de jeu proprement dites sont autant de moments de discussions qui permettent à chacun de partager ses connaissances, d'entrevoir les différents points de vue sur la ressource à partager et, *in fine*, d'aboutir à une vision collective d'une gestion durable du territoire.

Lors d'un projet antérieur, entre 2013 et 2015, nous avons ciblé quatre communautés représentatives des dynamiques sociales le long d'un transect plaine inondable - terre ferme. Pour développer le jeu, nous avons aussi engagé un partenariat avec l'école Casa Familiar de Curuaí (CFR) (lycée qui propose des enseignements en alternance auprès de jeunes adultes des communautés locales sur des pratiques agricoles plus durables). Le jeu et le modèle, dénommé *VárzeaViva*, étaient axés sur l'élevage et les activités agricoles, la pêche n'étant pas détaillée. Dans *VárzeaViva*, selon leur communauté d'appartenance définie par le jeu, les joueurs possèdent une propriété qu'ils doivent faire évoluer en interaction avec les autres (location de main-d'œuvre, location de pâturage) en choisissant entre quatre activités, la culture de manioc et/ou l'ouverture de pâturage, le développement d'un système agroforestier, l'élevage et la pêche. Le jeu est ensuite transformé en modèle multi-agents interactif, afin d'explorer des scénarios plus longs et mieux représenter les dynamiques sociales et naturelles ; le système est



Science participative au service de la pêche, Brésil.

interactif car le système multi-agents n'est pas autonome, mais dépend de décisions des joueurs sollicitées au cours de la simulation. Pour approfondir la question de la gestion durable de la pêche, soulevée de manière récurrente par les résidents à cette époque, outre la Feagle et le STTR, nous avons établi depuis 2019 un partenariat avec les syndicats des agriculteurs et des pêcheurs (colonies) des districts de Santarém, Óbidos et Jurutí, dont dépendent l'ensemble des communautés de la plaine, et le Mopebam (Mouvement de pêcheurs du bas Amazone).

Nous travaillons en partenariat avec l'ONG Sapopema, qui se mobilise depuis de nombreuses années pour une gestion durable des pêcheries en articulation entre les représentants des pêcheurs artisanaux et les instances gouvernementales de l'État du Pará et de l'État fédéral. Ce groupe se réunit tous les mois depuis octobre 2021 pour développer le jeu PescaViva, axé sur les activités de pêche dans la région, et un accord de partenariat signifiant les objectifs et modalités de participation à la recherche a été signé. Nous faisons également participer d'autres groupes au développement, des communautés de la région de Curuaí et un groupe de jeunes de la Feagle, les « gardiens du bien vivre ». Le jeu PescaViva met en scène les pêcheurs de communautés partageant la même ressource piscicole, dont le stock est sous tension. Ces acteurs voient dans le développement du jeu et les débats qu'il suscite une manière de travailler les accords communautaires de pêche, qui doivent être révisés dans la région suite au décret de l'État paru courant 2021 et une opportunité de renforcer les capacités de gouvernance des jeunes qui seront engagés.

Les premiers résultats

Lors des débats suite aux séances de jeu, les résidents ont souligné de manière récurrente plusieurs points :

– la difficulté à maintenir les troupeaux, car le rythme actuel des inondations limite l'exploitation des pâturages naturels et oblige à ouvrir de nouveaux

pâturages en zone de terre ferme, ou à les louer, ce qui engendre un coût par rapport aux gains espérés de l'activité ;

– les revenus incertains de la culture du manioc, car ils sont liés aux fluctuations du prix de la farine de manioc, outre la nécessité de disposer de main-d'œuvre et de terres (le cycle de sa culture sur une même parcelle est restreint à quelques années) et l'impact des grands troupeaux de bovins des *fazendeiros* sur la qualité des cours d'eau et sur leur assèchement si des pâturages sont créés en bordure ;

– la diminution du stock de poisson, principalement attribuée à la pêche industrielle, mais aussi au piétinement du bétail dans la plaine et à la dégradation des cours d'eau.

Nos résultats montrent que, finalement, actuellement ce n'est pas tant face aux changements climatiques que les habitants des *várzeas* se sentent démunis, mais plutôt face aux activités minières ou au développement de la pêche industrielle qui menacent leur territoire, leurs conditions d'existence et renforcent leur précarité.

Le plateau de Santarém, aux sols propices à l'agriculture céréalière, voit se développer rapidement, avec le soutien des politiques publiques, les monocultures de soja depuis une vingtaine d'années. Comme dans d'autres régions du Brésil, l'avancée du soja dans la région se traduit par un usage important de pesticides, dont les impacts sur les habitants sont ignorés. L'avancée du soja dans la région conduit également à la disparition de plusieurs communautés d'agriculteurs familiaux, soit parce que les terres sont accaparées par les céréaliers par intimidation, soit parce que l'impact des pesticides sur les cultures est tel que la terre doit être abandonnée. Les populations déplacées se retrouvent, pour la majorité, dans les quartiers périphériques de Santarém et, la plupart du temps, sans emploi.

À la différence de la recherche menée dans la région de *várzea*, où nous avons sollicité les acteurs après l'obtention des financements sur projet, nous conduisant à réajuster et reformuler les objectifs *a posteriori* avec eux, ici la première étape du processus a été de comprendre quelles étaient les attentes des acteurs vis-à-vis de la recherche qui pourrait être conduite et de définir les axes de recherche. En nous appuyant sur les relations de plusieurs membres de l'équipe avec le STTR et les syndicats des municipalités de Belterra et Mojuí dos Campos, la recherche a été entreprise avec ces acteurs lors de plusieurs ateliers afin d'exprimer collectivement les principaux défis de la région et, à partir de cet état des lieux et des compétences disponibles dans l'équipe de recherche, de définir la feuille de route. Trois thèmes ont émergé : l'insécurité foncière, les pesticides et l'agroécologie. Les syndicats ont demandé d'acquérir des données permettant de quantifier la production de l'agriculture familiale, ses pratiques, l'impact ressenti des pesticides. Une autre demande concernait la montée en compétences de jeunes agriculteurs par leur participation à la recherche. Cette feuille de route a été formellement validée par la signature d'un accord de coopération entre l'INCT Odisseia et les représentants des syndicats de travailleurs ruraux de trois municipalités, Santarém, Belterra et Mojuí dos Campos, qui forment la région du Planalto de Santarém. L'ensemble de la démarche méthodologique a été élaboré collectivement. L'organisation de la collecte de données

a été déduite d'un atelier de zonage participatif, qui a permis d'identifier trois grandes régions, l'une où le soja est dominant, l'une où l'agriculture familiale persiste au milieu du soja, une encore où l'agriculture familiale est majoritaire, mais où le soja progresse. Les jeunes et les représentants des syndicats ont participé à l'élaboration du questionnaire qui a été saisi sur smartphone via l'application KoBoToolbox. Cette application gratuite sur smartphone développée par l'université de Harvard permet de développer des questionnaires et de récolter des données (www.kobotoolbox.org). Les jeunes agriculteurs, appuyés par deux chercheurs basés à Santarém, ont réalisé les entretiens et collecté les réponses au questionnaire auprès de 544 ménages (soit 2 143 personnes), participé aux étapes d'analyses en enrichissant les données des questionnaires par les témoignages qu'ils avaient pu recueillir et enfin réalisé la diffusion des résultats auprès des communautés.

Au regard de l'impact des pesticides sur l'agriculture familiale, la recherche a permis aux représentants des syndicats et aux résidents de pouvoir se reconnaître collectivement comme victimes, car leurs difficultés (e.g. invasion par des insectes, dessèchement des cultures) et éventuellement leurs problèmes de santé (maux de tête, nausées, maladies chroniques) ne se révèlent pas être des cas isolés. Les résultats ont pu être présentés à différentes institutions locales et ont permis l'organisation par les syndicats d'un séminaire sur les perspectives de consolidation de l'agriculture familiale sur le Planalto de Santarém. Les résultats ont également pu être présentés au Forum permanent de lutte contre les pesticides, avec l'intention de discuter d'actions concrètes à mettre en place. À ces occasions, des défenseurs publics de l'État du Pará, des représentants d'ONG, des institutions d'appui techniques étaient présents. Cependant, bien que, lors de sa création en 2017, le Forum ait eu pour objectif d'offrir un espace de débat et de propositions d'actions, cette arène de discussion est aujourd'hui bloquée. En effet, le soutien politique à l'agro-industrie sur le territoire de Santarém est tel que la discussion des impacts des pesticides n'est plus vraiment possible, et d'autant moins depuis l'arrivée au pouvoir de Jair Bolsonaro, qui donne son soutien inconditionnel à l'agro-industrie et déconstruit minutieusement toutes les politiques d'appui à l'agriculture familiale et à l'environnement. Pour plus d'efficacité, les syndicats ont préféré s'orienter vers une réflexion sur l'agriculture biologique, abordant le problème des pesticides de manière contournée sans lui donner trop de visibilité. Cependant, l'ONG Terra de Direitos a engagé une action sur la base des données rassemblées pour incriminer la multinationale Cargill, propriétaire du port d'exportation de soja à Santarém, en tant que responsable des dommages créés par le soja sur le territoire.

En conclusion

Pour augmenter l'impact de notre recherche sur les populations locales et auprès d'elles, les défis sont multiples. L'un des principaux serait de renforcer l'articulation de ces travaux avec les pouvoirs publics. Dans le cas des pêcheries, et grâce à notre partenariat avec l'ONG Sapopema, mais aussi parce que nos activités sont parfaitement synchronisées avec l'agenda de révision des accords de pêche par les acteurs, cette articulation est en cours, et nous prévoyons d'inclure dès à présent des représentants des instances de l'État du Pará chargées de l'environnement. Une autre action d'envergure est de pouvoir amener les grands exploitants à un processus de négociation avec les

agriculteurs familiaux et les pêcheurs artisanaux. Dans le cas des pêcheries, nous l'envisageons si les acteurs avec lesquels nous travaillons sont intéressés, car des accords de type gagnant-gagnant sont possibles. L'exemple de la gestion du *Pirarucu* (*Arapaima*) dans l'État d'Amazonas, où pêcheurs industriels et artisanaux se sont entendus sur des accords de préservation qui fonctionnent bien, est probant. Dans le cas du soja, et dans le contexte politique actuel du Brésil, ce défi est malheureusement extrêmement complexe à relever. Les représentants des syndicats des agriculteurs, dont certains ont été menacés de mort, préfèrent se mobiliser pour montrer l'importance de l'agriculture familiale pour la sécurité alimentaire et la création d'emplois en zone rurale. Cette mobilisation peut par exemple conduire à la création d'un projet de loi municipale pour la création de « zones zéro pesticide », mais ne permettra pas, tout au moins pour l'instant, de faire monter en visibilité les nuisances provoquées par le soja et les pollutions associées.



© IRD/H. Benoit
Groupe photographié à la suite de l'atelier sur le jeu sérieux PescaViva dans la communauté de pêcheurs de Curuaí.

Pour en savoir plus

BOMMEL P. *et al.*, s.d. – Livelihoods of Local Communities in an Amazonian Floodplain Coping with Global Changes. In : Sauvage S., Sánchez-Pérez J. M., Rizzoli A. (eds), *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, Toulouse, <http://www.iemss.org/society/index.php/iemss-2016-proceedings>

CHAPUIS K. *et al.*, s.d. – Support Local Empowerment Using Various Modeling Approaches and Model Purposes: A Practical and Theoretical Point of View. In : Czupryna M., Kamiński B. (eds), *Advances in Social Simulation*. Springer Proceedings in Complexity. Springer, Cham., https://doi.org/10.1007/978-3-030-92843-8_7

COUDEL É., 2021 – Rendre visible les impacts des pesticides du soja : contributions et limites d'un observatoire de science citoyenne à Santarém, Amazonie brésilienne. *Vertigo*, 21 (3), <https://doi.org/10.4000/vertigo.33716>

Ont participé aux recherches

Marie-Paule Bonnet (IRD), Stéphanie Nasuti (UnB), Émilie Coudel (Cirad), Danielle Wagner Silva (université fédérale de l'Ouest de Pará [Ufopa], Brésil), Mariana Piva (école supérieure d'agriculture Luiz de Queiros, université de São Paulo, ESALQ/US, Brésil), Beatriz Abreu dos Santos (UnB, Brésil), Ricardo Folhes (université fédérale du Pará [UFPA], Brésil), Vincent Bonnal (Cirad), Valeria Fechinem (Centre d'études avancées multidisciplinaires [CEAM], UnB, Brésil), Denise Lima (Centre de développement durable [CDS], UnB, Brésil), Carlos José Sousa Passos (CDS, UnB, Brésil), Txai Mitt Schwamborn (CDS/UnB, Brésil), Ione Nakamura (ministère public du Pará, Brésil), Gracivane Rodrigues de Moura (Syndicat des travailleurs ruraux, agriculteurs et agricultrices familiales de Santarém [STTR], Brésil), Neriane Nascimento da Hora (Sapopema/post-doctorante CDS/UnB), Gustavo Melo (UFRJ), Joine Cariele (doctorante CDS/UnB) Kevin Chapuis (IRD), Christophe Le Page (Cirad), Pierre Bommel (Cirad), Syndicats des pêcheurs Z20, Z42 et Z19 de Santarém, Juruti et Obidos, Feagle.

14

Reconfigurations des modes de vie et dynamiques territoriales

De nouveaux mouvements sociaux ruraux s'affirment par la valorisation d'identités collectives et revendiquent l'appropriation des espaces traditionnellement occupés, avec le glissement de la « lutte pour la terre » à la « lutte pour les territoires ». Cela traduit à la fois la politisation de la relation identité-territoire et l'incorporation des questions du droit à la diversité des modes de vie et des formes d'occupation de la terre.

Contexte

À partir de la fin des années 1950, l'Amazonie brésilienne a connu de grands mouvements de peuplement. La population y a été multipliée par quatre et atteint 20 millions d'hommes et de femmes en 2000, bouleversant tant la dynamique des activités que celle des paysages. Alors que la croissance démographique a surtout été le fait des villes amazoniennes, ce sont les migrations vers les zones rurales qui ont polarisé l'attention, peut-être en raison de leur association avec la construction de routes médiatiques « bravant la forêt » et des grands programmes publics de colonisation.

Les mouvements sociaux et syndicaux structurés dans la région au cours des décennies 1970-1990 ont joué un rôle fondamental dans la lutte pour la justice foncière. La question de la protection de l'environnement devient rapidement un mot d'ordre partagé ; les identités locales deviennent des instruments politiques. On passe ainsi des revendications pour la terre aux revendications pour des « territoires » et pour la protection du « patrimoine » naturel et culturel.

Alors que la réforme agraire tâtonne, de nouvelles configurations foncières se font jour, remettant en question la propriété conventionnelle basée sur l'appropriation privée et individuelle. En parallèle, les modes de vie ruraux se reconfigurent, intégrant de plus en plus les activités urbaines dans les



Front d'urbanisation en Amazonie brésilienne, 1988

pratiques résidentielles et productives. La thématique foncière a ainsi été abordée à partir de différentes entrées, que l'on peut rassembler sous la thématique large de la « durabilité des territoires ».

L'occupation pionnière et la régularisation foncière militaire

On peut faire remonter les débuts des recherches entreprises à l'IRD (alors Orstom) sur la thématique large du « foncier » à l'époque où l'Amazonie brésilienne est connue comme le « dernier front pionnier », formé de terres libres et abondantes, porteur des aspirations des colons, particulièrement ceux originaires du Nordeste semi-aride. Ainsi, entre la fin des années 1960 et 1980, les grandes dynamiques territoriales se concentrent sur la frange occidentale de l'Amazonie, région aujourd'hui connue comme l'« Arc de la déforestation ». Ce sont alors les dynamiques croisées du peuplement, de l'accès à la terre, de l'urbanisation et de la transformation des paysages qui polarisent les attentions des chercheurs.

Il est important de retenir le rôle du Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), dont la médiation a été fondamentale pour engager et soutenir les recherches en sciences humaines en temps de dictature. En effet, la colonisation de l'Amazonie, opérée à coups de politiques et de

PARTENAIRES

Université de Brasília (UnB),
Centre de développement durable
(CDS), Brésil

Institut national de recherches
amazoniennes (INPA), Brésil

Centre des hautes études amazoniennes
de l'université fédérale du Pará
(NAEA/UFPA), Brésil

Musée Paraense Emílio Goeldi, Brésil

propagande gouvernementales, comporte une forte dimension idéologique, celle de « la Marche vers l'ouest », de l'expansion nationale et du développement, que les chercheurs IRD/Orstom ont rapidement saisie. Dans sa dimension idéologique, la colonisation est supposée offrir aux migrants la promotion verticale impossible dans les régions économiquement et sociologiquement stabilisées. En promettant les mêmes chances pour tous sur la frontière, l'État prône un égalitarisme théorique qui est une concrétisation de l'utopie pionnière. C'est en effet par « l'incorporation » des terres périphériques que l'on promet d'assurer le « miracle économique » du pays entier, d'offrir un accès à la terre aux petits producteurs pauvres du Nordeste et de garantir la sécurité nationale contre les menaces extérieures et intérieures.

Progressivement, alors que la frontière se stabilise, géographiquement et socialement, les thématiques de recherche évoluent.

Au cours des années 1980 et 1990, les études reconstituent les courants migratoires et les modalités d'installation des colons, et scindent le mécanisme de l'occupation en deux grandes vagues. La première époque est celle du peuplement, de l'occupation spontanée, caractérisée par une importante densité de *pioneiros* ; dans un second temps, l'installation de ces pionniers permet d'améliorer les conditions d'accès à la zone (ouvertures de routes, premiers déboisements) et, en conséquence, attire les spéculateurs et les éleveurs plus capitalisés, qui entraînent dans leur sillage une grande vague d'appropriation frauduleuse de la terre et aboutit souvent à l'expulsion des occupants et à un



Fabrication de clôtures au Brésil.

processus accentué d'exode rural. Ce processus d'incorporation des terres au marché foncier mène inévitablement à la concentration foncière, en lien avec notamment la consolidation des *latifundios* et l'installation de grands projets de développement (extraction minière, agro-négoce).

De façon courageuse, les chercheurs abordent également les expériences de violences propres aux fronts pionniers. Le film *La Terre et la Peine* (1997), de Frédéric Létang (http://www.film-documentaire.fr/4DACTION/w_fiche_film/4347_1), décrit parfaitement la violente compétition qui se joue pour la conquête de la terre au cœur de la forêt et présente avec justesse les acteurs de ces affrontements, tous légitimes selon la logique qui les meut.

La création d'une loi de réforme agraire en 1964 (loi du statut de la Terre) et d'institutions de régulation (l'Institut brésilien de réforme agraire [IBRA] en 1964 puis l'Institut brésilien de colonisation et de réforme Agraire [Incra] en 1970), chargées d'élaborer un cadastre national des établissements ruraux et d'administrer les terres publiques, n'a en effet pas conjuré la vague de conflits et de « grillonnages » (appropriations illégales de terres par le truchement de faux titres de propriété) qui s'est propagée sur les traces de la frontière d'occupation, allant de l'est du Pará au nord de l'Acre, absorbant au passage l'État du Rondônia.

Des pouvoirs spéciaux sont attribués aux militaires pour « pacifier la terre » au début des années 1980, mais, en dépit de l'attribution de nombreux titres de propriété, notamment à des petits agriculteurs, les mesures déçoivent les militants de la réforme agraire, selon lesquels la régularisation foncière a été pensée comme un élément supplémentaire du processus de marchandisation de la terre et constitue une manière détournée de conforter le processus d'appropriation des terres par les entrepreneurs originaires du Sud. De la même manière, la réforme agraire, pourtant déclarée priorité nationale en 1985, est contestée : un nombre infime d'agriculteurs ont de fait été installés dans des projets de lotissements de la réforme agraire d'Amazonie au regard du nombre de demandeurs de terres rurales au Brésil. De plus, l'occupation de la terre devait se faire en accord avec les objectifs de modernisation du secteur rural qui animaient le gouvernement militaire depuis sa prise de pouvoir. Par exemple, une des conditions motivant l'attribution du titre de propriété était que l'activité principale du lot en soit l'élevage bovin, tandis que la productivité de la parcelle était attestée par son état de défrichement. Ce bilan traduit la vieille tendance brésilienne de chercher à résoudre la question des petits producteurs sans incommoder les élites rurales consolidées dans des zones d'occupation plus ancienne. Ce texte n'aborde pas la question des territoires amérindiens et du déplacement des populations autochtones, qui nécessiterait un autre chapitre. Cela ne doit pas cependant occulter le fait que le territoire dont il est question était occupé de longue date.

Protéger conjointement la biodiversité et la sociodiversité

Au début des années 1990, de nouveaux dispositifs fonciers et environnementaux voient le jour, qui cherchent à concilier l'accès à la terre et la protection de l'environnement : d'une part, des lotissements de la réforme agraire d'un nouveau genre – projets de développement durable (PDS), projets d'établissements extractivistes (PAEx) –, destinés aux agriculteurs familiaux ; d'autre



Promotion de l'agriculture extensive au Brésil.

part, dans la catégorie large des aires protégées, plutôt destinée aux populations traditionnelles, en plus des territoires amérindiens, les unités de conservation dites « d'usage durable » – réserves extractivistes (Resex), réserves de développement durable (RDS) – et les territoires quilombolas (occupés par les Afro-descendants). Une bonne partie des habitants de ces territoires de l'Amazonie profonde, ramasseurs de noix du Brésil, collecteurs de caoutchouc, casseuses de *babaçu*, riverains des *várzeas*, sont encore souvent victimes de figures d'autorité locales qui justifient leur domination par des droits de propriété souvent fictifs. C'est à ces groupes sociaux que s'adressent ces dispositifs, qui traduisent un élargissement des droits territoriaux pour les populations rurales, notamment par la reconnaissance juridique du terme « populations traditionnelles ». Ces « politiques de la différence » rendent possible l'émergence de nouvelles modalités de transfert de la terre, notamment via l'usufruit ou la propriété collective, mais elles rompent aussi avec le paradigme séparant la « nature » de la « culture » qui prévalait jusqu'alors dans les structures de protection environnementales. Ces nouveaux dispositifs sont alors présentés comme des outils opératoires du développement durable, et promettent d'en concilier les trois piliers en alliant la préservation de l'environnement à la reconnaissance culturelle, sociale et économique des populations traditionnelles, tout en assurant leur sécurité économique.

Ainsi, en s'intéressant à ces nouvelles possibilités pour la protection de la biodiversité et de la sociodiversité, un plus grand nombre de chercheurs et de disciplines se sont, de façon indirecte, engagés sur la problématique foncière, ce qui a permis, d'une part, d'élargir le débat à l'ensemble de l'Amazonie, incluant notamment les espaces isolés, et, d'autre part, d'y associer un plus grand nombre de groupes sociaux, de populations traditionnelles et de peuples amérindiens.

Le débat acquiert notamment de nouveaux contours politiques avec la consolidation de nouveaux mouvements sociaux ruraux, qui s'affirment par la valorisation d'identités collectives et revendiquent l'appropriation des espaces traditionnellement occupés. Les travaux font alors ressortir le glissement de la « lutte pour la terre » à la « lutte pour les territoires ». Plus qu'une simple coquetterie sémantique, cette formule traduit à la fois la politisation de la relation identité-territoire par la projection sur l'espace des marqueurs culturels, ainsi que l'incorporation des questions du droit à la diversité des modes de vie et des formes d'occupation de la terre.

Il est important de souligner la force de proposition dont font preuve durant cette période les mouvements sociaux, qui revendiquent de nouveaux modes de gouvernance des ressources (par exemple, les « accords de pêche » dans les plaines d'inondation), ainsi que de nouvelles configurations territoriales. L'exemple le plus connu est celui de la « réserve extractiviste », dispositif environnemental dont l'origine est fortement chargée socialement et marquée par la lutte politique. Ce modèle se caractérise par le retour à la propriété fédérale de la terre et l'appropriation collective, obtenue par les habitants en contrepartie de l'acceptation d'une « responsabilité environnementale ». Il a été proposé par le mouvement des *seringueiros* (collecteurs de caoutchouc). Il s'appuie notamment sur la valorisation d'une forme différenciée de relation aux ressources naturelles, l'« extractivisme », terme adapté du lusitanisme



Transport de fibres de palmiers *piassaba*, Amazonie, Brésil, 1990.



Boutique de tissus dans la ville de Téfé, Amazonas, Brésil.

extrativismo. La notion recouvre l'ensemble des systèmes d'exploitation des produits de la forêt, à condition que ceux-ci soient intégrés dans une économie de marché à l'échelle régionale, nationale ou internationale. Elle se distingue en cela de la cueillette, réservée aux ressources destinées à la consommation familiale ou à un échange local.

Dans les années 2000, face aux blocages fonciers qui perdurent et au manque de volonté politique de régulariser les terres traditionnellement occupées, émergent en contrepoint des stratégies alternatives qui cherchent à protéger les ressources et les pratiques indépendamment de l'accès aux politiques foncières ou environnementales. Divers projets de recherche s'interrogent sur le potentiel des instruments de « patrimonialisation » dans les processus de construction des territoires. Ce mécanisme innovant consiste à protéger les ressources naturelles et cultivées en faisant enregistrer l'ensemble du système de production au patrimoine de la nation. Il repose sur le principe d'une interdépendance entre diversité biologique et diversité culturelle ; la mise en œuvre des savoir-faire qui sous-tendent les systèmes agricoles ou extractivistes dépend donc de la protection croisée des modes de vie, des pratiques spirituelles et des territoires. En 2010, l'Institut du patrimoine historique et artistique national brésilien (IPHAN) a inscrit le système agricole traditionnel du Rio Negro, partagé par 22 peuples amérindiens, comme patrimoine

culturel de la nation ; il s'agissait du premier système agricole à être reconnu en tant que tel. Il faut souligner l'engagement du projet scientifique franco-brésilien « Populations, agrobiodiversité et connaissances traditionnelles associées » (Pacta, 2005-2019) dans ce processus, ainsi que le partenariat de recherche participatif mis en œuvre, associant les associations locales amérindiennes, des ONG, des institutions publiques et des chercheurs.

La thématique de l'agrobiodiversité trouve un autre point d'intersection avec la question des dynamiques territoriales par l'étude des phénomènes de circulation. Les travaux d'Eloy et Emperaire (2011) réintroduisent notamment la dimension urbaine, centrale pour la compréhension des nouveaux paradigmes de mobilité des individus et des familles rurales amazoniennes, bien au-delà de l'exode rural conventionnel. L'analyse des phénomènes de multi-résidence des populations amérindiennes a montré l'intensité des pratiques de circulation entre les zones rurales et urbaines (cas des territoires quilombolas du Trombetas). Ces travaux montrent que la ville constitue une caractéristique essentielle des stratégies résidentielles et productives des populations rurales amazoniennes, partagées sur l'ensemble de la région, même sur les sites isolés. Ils sont par ailleurs importants pour comprendre que la mobilité n'est pas contradictoire avec l'attribution de droits fonciers aux populations rurales et traditionnelles.

La reconfiguration des modes de vie ruraux amazoniens est une thématique centrale pour comprendre les dynamiques territoriales de l'Amazonie contemporaine. Un pas dans ce sens a été fait dans le cadre du programme de recherche Duramaz (2007-2014). Prenant au pied de la lettre l'idée que l'Amazonie pourrait être un « laboratoire du développement durable », le projet a mis en place un protocole comparatif, dans le temps et l'espace, cherchant à éclairer divers aspects de la « durabilité des territoires » : le rôle des politiques publiques, les usages de la biodiversité, la gestion communautaire ; le changement climatique ; l'évolution des systèmes alimentaires et productifs ; les nouvelles dynamiques du peuplement.

Conclusion

Le modèle développementiste amazonien qui a justifié l'ouverture de la frontière dans les années 1960 trouve aujourd'hui un nouveau souffle. De nouveaux axes de pénétration, notamment des voies de chemin de fer, sont construits pour le transport du minerai ; des ports sont bâtis pour le transport du soja, qui avance sur les territoires de l'agriculture familiale ; des infrastructures pour l'installation de lignes électriques constituent autant de nouvelles menaces pour des territoires fragilisés. Les politiques publiques se concentrent sur les grandes propriétés foncières (Cadastro Ambiental Rural, Projet Terra Legal Amazônia) comme outils de régularisation du foncier.

L'Amazonie légale, qui s'étend sur plus de 5 millions de kilomètres carrés, a connu au cours des 40 dernières années une diminution de la surface forestière de plus de 10 000 km² par an, à l'exception d'une accalmie durant la période 2009-2015 (voir chapitre 3). Le rôle des modèles d'occupation alternatifs pour la protection du biome est essentiel pour éviter que le déboisement ne s'accélère, comme c'est le cas actuellement.

Il est cependant nécessaire que les gestionnaires s'approprient de nouveaux outils et techniques pour le suivi des ressources et la cartographie des territoires. De plus en plus, les universités et les ONG s'engagent dans ce processus ; les mouvements sociaux se mobilisent (réseaux sociaux, dénonciation des entreprises qui s'approvisionnent en produits issus de la surexploitation des forêts). De nouveaux outils collaboratifs voient le jour, par exemple MapBiomias, qui est un réseau collaboratif formé par des ONG, des universités et des start-up technologiques. Le projet rend accessible à tous la visualisation de la conversion des terres. Il produit une cartographie annuelle de l'occupation et de l'utilisation des sols depuis 1985, valide et rapporte chaque événement de déforestation détecté au Brésil depuis janvier 2019, et surveille les eaux de surface et les cicatrices d'incendie tous les mois depuis 1985 (Mapbiomas Brasil). Enfin, le paradigme de la durabilité, qui passe par la valorisation de la diversité et la revendication d'une plus grande autonomie dans la gouvernance et la gestion communautaire, va dans le même sens.

Pour en savoir plus

ELOY L., EMPERAIRE L., 2011 – La circulation de l'agrobiodiversité sur les fronts pionniers d'Amazonie (région de Cruzeiro do Sul, état de l'Acre, Brésil). *L'Espace géographique*, 40 (1) : 62-74.

NASUTI S. *et al.*, 2013 –, La construction de territoires multisitués en Amazonie. Le cas des Quilombolas du Trombetas (Pará, Brésil). *L'Espace géographique*, 4 (42) : 324-339.

NASUTI S. *et al.*, 2014 – Régularisation foncière et mobilités rurales-urbaines en Amazonie brésilienne. *Espace populations sociétés*, 2 (3) : <http://journals.openedition.org/eps/5789> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/eps.5789>

Ont participé aux recherches

Stéphanie Nasuti (UnB), Philippe Léna (IRD), Ricardo Folhes (UFPA), Laure Emperaire (IRD), Catherine Aubertin (IRD), Martine Droulers (CNRS), François-Michel Le Tourneau (CNRS).

15

Plantes cultivées : produire et conserver de la diversité

De manière surprenante, ce n'est que récemment que la biodiversité associée aux agricultures traditionnelles (agrobiodiversité) commence à avoir une visibilité sur la scène politique et sur celle de la biologie de la conservation, alors que la biodiversité forestière, celle qui est considérée comme spontanée, a été au centre de nombreuses recherches.

Contexte

Les écosystèmes amazoniens tels que nous les connaissons aujourd'hui résultent d'une histoire complexe faite de processus écologiques et d'une gestion humaine. C'est à cette interface que se situent les recherches du programme Pacta (« Populations, agrobiodiversité et connaissances traditionnelles associées »), coordonné par l'université d'État de Campinas (Unicamp) et l'IRD entre 2005 et 2019 dans plusieurs contextes géographiques et culturels. Son objectif est de comprendre les dynamiques socio-culturelles attachées à un compartiment de la biodiversité peu étudié, celui de l'agrobiodiversité, entendue ici comme la diversité des plantes cultivées. Le Pacta s'inscrit dans la continuité d'autres recherches qui soulignent les liens étroits entre activités agricoles et activités forestières.

De manière surprenante, ce n'est que récemment que la biodiversité associée aux agricultures traditionnelles commence à avoir une visibilité sur la scène politique et dans le domaine de la biologie de la conservation, alors que la biodiversité forestière, celle qui est considérée comme spontanée, a été au centre de nombreuses recherches. Au demeurant, les travaux récents en archéobotanique et en écologie historique montrent que les dichotomies entre « cultivé/spontané » et « sauvage/domestiqué » demandent une approche nuancée et qu'elles ne répondent pas obligatoirement à des champs disciplinaires tels que l'agronomie, la foresterie ou l'écologie les définiraient. Les pratiques, les savoirs, les normes au fondement de cette diversité biologique voulue autorisent une grande diversité d'imbrications et de superpositions entre les pôles mentionnés.

PARTENAIRES

Université d'État de Campinas
(Unicamp), Brésil

Institut socio-environnemental (ISA),
Brésil

Associação das Comunidades Indígenas
do Rio Negro (ACIMRN)

Federação das Organizações Indígenas
do Rio Negro (FOIRN)



Fruits et canne à sucre issus d'un abattis dans le Rio Negro.

L'histoire des agricultures traditionnelles n'est pas celle d'une succession d'étapes portée par une vision linéaire des pratiques agricoles, mais celle d'ajustements continus entre des environnements socio-politiques et écologiques, des pratiques sociales et techniques, et des choix culturels. Trois exemples de registres de données soulignent cette imbrication. Ce qui est considéré comme le plus grand ensemble forestier mondial, pensé comme non altéré par l'action humaine, résulte de multiples actions anthropiques sur le temps long. Un premier indicateur en est la présence d'assemblages d'espèces domestiquées autour de sites archéologiques résultant très probablement d'un enrichissement volontaire de l'environnement en ressources. Un deuxième élément est lié à une gestion du sol avec la présence des fertiles terres noires des Amérindiens, qui couvrent parfois des dizaines d'hectares, riches en nutriments et, fréquemment, associées à des vestiges archéologiques. Le plus ancien de ces sites, dans le haut Madeira, remonte à 3 500 ans avant l'ère commune (AEC). L'occupation de la majeure partie de ces terres est cependant datée des débuts de notre ère et se poursuit parfois jusqu'à



Agriculture sur brûlis, aux environs de Santa Isabel do Rio Negro.

aujourd'hui. Enfin, les vestiges archéobotaniques montrent qu'en marge des premières cultures telles que le manioc ou l'*ariá* (*Calathea* sp.) au début de l'Holocène, il y a environ 10 000 ans, de nombreuses autres espèces non cultivées composaient des régimes alimentaires variés et que la diversité des ressources au cours de cette période s'est considérablement accrue. Ces assemblages d'espèces, cultivées et forestières, plaident pour des pratiques liées à une agriculture sur brûlis insérée dans le fonctionnement de l'écosystème forestier; donc pour l'existence de pratiques durables qui n'impactent pas de manière violente les paysages amazoniens.

L'agrobiodiversité telle qu'elle a été abordée dans le programme Pacta ne constituait qu'un des fils conducteurs d'une interrogation plus large, qui portait sur le devenir d'agricultures historiquement marginalisées sur les plans techniques, cognitifs, économiques et territoriaux. Celles-ci sont pensées comme une entrave à un développement agricole fondé sur une modernité technique et économique qui tend à uniformiser savoirs et pratiques, et ne reconnaît que rarement les systèmes de valeurs localement attribués à ces objets complexes, culturels et biologiques, que sont les plantes cultivées. Ce contexte perpétue de fortes asymétries de pouvoir entre savoirs scientifiques et locaux, encore plus s'ils sont féminins. Le cadre global est

aussi marqué par une érosion des ressources phytogénétiques à l'échelle mondiale, avec pour conséquences la perte, d'une part, d'une diversité génétique, potentielle réponse aux enjeux du changement climato-écologique et, d'autre part, celle d'un bien culturel de nature biologique forgé au cours de l'histoire, soit un patrimoine culturel dont la continuité relève d'un droit à exprimer librement les choix culturels (et non seulement culturels) dans les pratiques productives, cognitives et sociales.

Un autre élément, relevant de l'éthique et du droit, a fortement modelé les pratiques de recherches de Pacta, en visant à un dialogue constant avec les partenaires locaux. À propos de la conservation de la biodiversité, les relations avec les acteurs locaux ne s'inscrivent plus dans des rapports d'assistance, mais dans ceux d'échange et de partenariat, position de principe confortée ultérieurement par l'Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Sur le plan du droit, la réalisation du programme Pacta était alors encadrée, en 2005, par la mesure provisoire sur l'accès aux ressources génétiques et aux connaissances traditionnelles associées. L'obtention des autorisations de recherche pour chacun des « terrains » était conditionnée à l'établissement d'un terme de consentement préalable informé spécifiant les attendus de la recherche, ses méthodes, les usages de ces résultats, les droits des parties et qui incorporait, le cas échéant, des demandes spécifiques des populations concernées. La démarche de Pacta a constitué pendant plusieurs années le document de référence du rectorat de l'Unicamp pour l'obtention de ce terme de consentement.

Les trois phases de Pacta visaient à : comprendre les bases sociales et écologiques d'une diversité de plantes cultivées dans un contexte donné ; identifier les instruments susceptibles de donner une visibilité à l'échelle nationale de ces agricultures traditionnelles ; enfin, proposer une réflexion sur leur devenir dans un contexte marqué par une globalisation et une intensification des échanges. Le programme s'est déroulé sur plusieurs terrains selon trois entrées majeures, complémentaires : l'agrobiodiversité en tant que processus socio-environnemental ; les formes de qualification des plantes cultivées ; et les politiques publiques et instruments de conservation de cette diversité biologique, avec des centres d'intérêt, des sensibilités et des méthodologies différentes, et avec pour point de départ une plante ou un système agricole. Les démarches avaient en commun l'objectif d'identifier les valeurs immatérielles dont est porteuse l'agrobiodiversité et d'interroger en quoi celle-ci participe du fonctionnement de la société et des rapports à un territoire, et les révèle. Ce texte construit à partir des principaux apports de chacun des volets de recherche met en évidence la diversité des formes de production de l'agrobiodiversité, la richesse des rapports que celle-ci entretient avec les sociétés et l'urgence de penser des politiques publiques qui prennent en compte une variabilité de situations. Il se clôt par quelques recommandations issues de cette recherche.

Une diversité de processus socio-environnementaux

Les rapports de la FAO sur l'état des ressources phytogénétiques dans le monde montrent une connaissance précise de l'amplitude des collections de germoplasme conservées dans diverses institutions et des inno-

ventions (maisons de semences, gardiens de la biodiversité...) développées pour assurer cette conservation. Néanmoins, peu de données permettent d'évaluer précisément l'amplitude et l'état de la diversité des plantes cultivées assurés par les populations locales. Les travaux de Pacta ont tous souligné l'amplitude de la diversité des plantes cultivées en contexte amérindien ou de populations traditionnelles. Ainsi, et ce n'est qu'un exemple, 52 agriculteurs de la seule région de Cruzeiro do Sul, dans l'Acre, géraient un éventail de 218 genres avec 263 espèces, alors que la conservation à l'échelle nationale porte sur 426 genres et 1 956 espèces : l'effort de conservation effectué par les populations locales apparaît très directement dans ces nombres. La centaine de variétés de manioc relevée dans le moyen Rio Negro et les plus de 300 autres espèces ou variétés cultivées par 28 agricultrices renforcent le constat. On retrouve cette même amplitude de plantes cultivées dans les abattis des Mebêngokrê (Kayapó) du Xingu avec, en son centre, la diversité de la patate douce (*Ipomoea batatas*) représentée par 56 variétés.



Remplissage d'une hotte de portage de tubercules de manioc, Santa Isabel do Rio Negro.

L'existence de cette diversité agrobiologique résulte de processus cumulatifs de production accidentelle de nouveaux morphotypes (via des mutations ou une reproduction sexuée, par exemple dans le cas du manioc) et de choix de conservation effectués par des générations de « collecteurs de diversité », qui privilégient le divers à l'homogène. Ainsi, la recherche sur le *pequi* (*Caryocar brasiliense*), menée auprès des Kuikuro (Mato Grosso) met en évidence d'importantes variations phénotypiques des fruits assimilables à un syndrome de domestication, soit une diversité qui se manifeste aujourd'hui dans les *pequizais* (vergers poly-variétaux). Néanmoins, cette domestication ne peut être lue sur le seul plan génétique et apparaît indissociable de son insertion sociale.

La diversité agrobiologique est intimement liée à une esthétique de la diversité des plantes dans les abattis et à leur rôle mémoriel. Dans les abattis des Mebêngokrê, la présence d'espèces ou de variétés obtenues, collectées, échangées auprès de parents ou de connaissances révèle des attachements et des trajectoires. L'importance de la circulation des plantes cultivées se retrouve dans le Rio Negro. Elle répond à des normes sociales : les plantes, en particulier les variétés de manioc, circulent principalement entre femmes sur un mode intergénérationnel, alors que les fruitiers circulent plutôt entre hommes. Les deux exemples montrent combien l'agrobiodiversité est liée à un fonctionnement de la société, et combien elle la reflète. De par le réseau social qu'elle mobilise, la circulation qualifie non seulement la personne en charge du foisonnement végétal des abattis, mais aussi la plante qui transite entre des personnes, des lieux, des paysages, des étapes de vie. De plus, la diversité, d'intérêt collectif et non appropriable individuellement, constitue un bien intergénérationnel qui circule à grande échelle et participe d'une cohésion socio-économique et d'une égalité d'accès aux ressources végétales. Sur les fronts d'expansion agricole de l'Acre, les réseaux d'échanges de plantes traduisent une dynamique de fixation collective dans l'espace. Vectrices de significations affectives et mémorielles, les plantes ont un rôle qui dépasse largement le registre de l'usage et, avec la culture matérielle et le système alimentaire qui en découlent, elles sont à la base de la notion de système agricole traditionnel.



Un abattis récemment ouvert en lisière de forêt, planté en canne à sucre et nombreuses variétés de manioc, région de Santa Isabel do Rio Negro.

Qualifier l'agrobiodiversité

La compréhension de la pluralité de mondes construits autour des plantes cultivées et par elles a principalement été développée dans le cadre des travaux sur le *guaraná* (*Paullinia cupana*). Cette plante est au centre de la vie sociale des Sateré-Mawé et mobilise, outre ceux-ci, une diversité d'acteurs et de discours autour des enjeux économiques et socio-politiques de sa valorisation sur les marchés nationaux et internationaux. L'approche est fondée sur le concept d'ontologie de la plante, soit de la performativité d'un discours porté sur le *guaraná*, susceptible de modifier les pratiques, et donc ce qu'elle est – ses contours, son contenu, ses propriétés – en fonction des contextes et enjeux. Qu'il s'agisse du *pequi*, du *guaraná* ou du manioc, chacune de ces plantes, tout comme les produits qui en sont issus, doit être traitée de la manière correcte, celle qui est issue de normes partagées. L'expression de sa fonction sociale passe par le respect d'une éthique des relations entre la plante et ceux qui prennent soin d'elle. L'approche multi-espèces menée chez les Pataxó (Bahia) montre que la relation entre humains et plantes cultivées renvoie aussi à un compagnonnage entre ces entités.



Circulation des piments
entre abattis dans le Rio Negro.

Les situations locales sont intégrées, et l'ont été de tout temps, dans des jeux de rupture et de continuité sous la dépendance de dynamiques globales. L'actuelle modernité se traduit en particulier par un déplacement du lieu de vie en ville (les petites bourgades en développement le long des fleuves), par une insertion économique sous forme monétisée et par des politiques de développement agricole. Mais le lien avec le lieu d'origine se maintient, par exemple dans les situations de risque engendrées par l'environnement urbain. Chez les Ye'kuana, seuls les aliments provenant des abattis des villages d'origine sont alors consommés. La denrée devient porteuse de l'ensemble des soins transmis par les parents. Le retour aux lieux forestiers reste à approfondir dans le contexte de l'épidémie de Covid-19.

Les agricultures périurbaines analysées dans l'Acre auprès de descendants de *seringueiros* et dans le Rio Negro en contexte amérindien répondent à deux modèles. Dans l'Acre, cette agriculture est associée à une stratégie disruptive, avec recréation d'un système agricole qui, à partir de réseaux étendus de connexion, importe une diversité agricole qui répond aux demandes de nouveaux consommateurs. Il y a donc recréation de ce système agricole, alors qu'en contexte amérindien, à Santa Isabel du Rio Negro, la stratégie est conservatoire, avec une transposition de la diversité agricole et de réseaux de circulation semblables à ceux développés en zone forestière. L'abattis y apparaît comme un espace de résistance à une forme de modernité et, en première approche, l'environnement urbain ne remet pas en cause son fonctionnement. Une ethnographie des trajectoires de trois femmes souligne néanmoins une diversité des attachements à la pratique agricole. La prise en charge et la maîtrise de l'abattis sont centrales dans la construction de l'identité féminine amérindienne du Rio Negro, mais celle-ci est malmenée par les projets de modernisation agricole. Une fragilité face à ces dynamiques globales et à des choix économiques s'exprime aussi dans l'installation de migrants venus du haut Rio Negro, dans la zone d'influence de Manaus. Quelles que soient ces configurations, les agricultures traditionnelles sont aujourd'hui étroitement articulées aux contextes urbains.

Droits et instruments de conservation

Les interactions décrites dépassent celles qui relèvent de la seule génétique évolutive mobilisée dans la conservation *in situ* qui, elle-même, marque une forte avancée vis-à-vis de la conservation *ex situ*, fondée sur des banques de germoplasme, qui isolent le matériel biologique de son environnement socio-écologique. Les objets et les échelles spatio-temporelles mobilisées par la conservation *ex situ* et *in situ* ne dialoguent encore que difficilement. L'enjeu de la conservation devient plus ample : il s'agit non seulement de maintenir le réseau de significations et de valeurs qu'ont les plantes pour les populations qui les gèrent, mais aussi d'identifier leurs articulations avec les standards légaux.

Un début de visibilité de ces agricultures sur la scène brésilienne s'opère dans le domaine culturel : celui qui reconnaît au fait agricole, au-delà de son ancrage écologique, une spécificité socio-culturelle, une autre manière de voir et de faire. Sous l'égide de l'IPHAN, avec un partenariat Unicamp,



Torréfaction de la farine de manioc, Rio Negro.

IRD, ISA et associations amérindiennes du Rio Negro, le système agricole traditionnel du Rio Negro a été reconnu comme patrimoine immatériel de la nation en 2010. Dix ans plus tard, ce titre, le premier à concerner un système agricole, est aujourd'hui en cours de revalidation. Plus récemment, le système agricole des quilombolas du Vale do Ribeira a été reconnu comme patrimoine immatériel. Des avancées se font jour aussi dans le domaine des politiques environnementales : par exemple, le brûlis, jusqu'à peu condamné en bloc, alors que le contrôle par les populations locales de sa saisonnalité et de son emprise spatiale en fait un atout de productivité et de conservation de la biodiversité pour les agricultures locales, comme dans le contexte du Jalapão.

De futures recherches

La contribution centrale du programme Pacta a été d'intégrer dans le contexte brésilien les systèmes agricoles traditionnels et de les mettre en dialogue avec l'agroécologie. Produire, dans le domaine agronomique, était vu, et l'est encore en grande partie, comme un fait commensurable entre toutes les agricultures, susceptible de mobiliser des univers techniques qui

pouvaient se compléter, s'emboîter ou être remplacés et sur lesquels intervenir faisait sens dans la logique d'un gradient évolutif linéaire où chaque nouvelle étape absorbait l'antérieure. En somme, l'hybridation d'un répertoire agro-technique traditionnel avec un répertoire agro-technique scientifique semblait prometteuse, mais elle faisait fi des rapports de pouvoir exprimés par le second. Si la configuration peut s'avérer fructueuse en certains points, elle est insuffisante pour assurer un devenir à la diversité de ces agricultures traditionnelles. Ainsi, les apports des Indigenous Peoples and Local Communities (IPLC) concernent autant l'existence matérielle d'une diversité biologique – sur laquelle reposent *in fine* nos modes d'alimentation à l'échelle mondiale – que celle, immatérielle, liée à une diversité de rapports au vivant et que les contextes fonciers et environnementaux dans lesquels l'agrobiodiversité est insérée.

À l'issue de Pacta, de nouvelles lignes de recherche se dessinent. Elles prennent sens dans le domaine des agricultures traditionnelles comme dans celui de l'agroécologie. Il s'agit de renforcer la compréhension de leurs dynamiques et de leurs vulnérabilités sociales et écologiques ; de développer de nouvelles connexions interculturelles qui s'appuient sur des recherches collaboratives pensées dès l'amont sur les plans scientifiques et institutionnels ; de renforcer les approches pluridisciplinaires sur la biodiversité et l'agrobiodiversité, en intégrant non seulement les sciences humaines et les sciences de la vie, mais aussi les approches du droit et de la philosophie : « Comprendre [le] régime ontologique [des plantes] est fondamental si nous voulons proposer des modes *sui generis* de protection et de sauvegarde des connaissances traditionnelles associées à la biodiversité, qui puissent être effectivement utilisés par les peuples indigènes pour la promotion de leurs droits » (Smith et Fausto, 2016).

Pour en savoir plus

ARROYO-KALIN M., 2021 – « As terras antrópicas da Amazônia: mais que somente terras pretas ». In NEVES E. G. (éd.) : *Biodiversidade e Agrobiodiversidade como legados de Povos Indígenas*, São Paulo, SBPC, 6 : 33-46.

BRONZIO E. S. et al. (eds), 2019 – *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES, 1 148 p., <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

CASSINO M. F. et al., 2021 – « Archaeobotany of Brazilian Indigenous Peoples and Their Food Plants ». In Jacob M. C. M, Albuquerque U. P. (eds) : *Local Food Plants of Brazil*, Springer International Publishing, Cham : 127-159, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69139-4_8.

NERI I. F. et al., à paraître – « Produtos indígenas do Sistema Agrícola Tradicional do Rio Negro -Amazonas/Brasil: experiências de valorização de um patrimônio cultural ». In Nogueira M. et al. (ed.) : *Coletânea do Mestrado Profissional em Sustentabilidade junto a Povos e Territórios Tradicionais (MESPT)*, UnB.

SMITH M., FAUSTO C., 2016 – Socialidade e diversidade de pequis (*Caryocar brasiliense*, Caryocaraceae) entre os Kuikuro do alto rio Xingu (Brasil). *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 11 : 87-113.

Ont participé aux recherches

Mauro Almeida (Unicamp), Laure Emperaire (IRD), Geraldo Andrello (ISA), Marilena A. de Arruda Campos (ESALQ-USP), Maria Bueno de Carvalho* (Unicamp), Patricia Bustamante (Embrapa), Thiago Cardoso* (INPA), Manuela Carneiro da Cunha (USP, U. Chicago), Pedro Castelo (Fundaj), Mélanie Congretel* (Agro-Paris-Tech), Pascal Cristofoli (EHESS), Carla Dias (ISA), Janaina Diniz (UnB), Ludivine Eloy (CNRS), Thayná Ferraz da Cunha Pinheiro* (UFRJ), Geoffroy Filoche (IRD), Esther Katz (IRD), Elaine Moreira (UFRO), Fernando Niemeyer* (Unicamp), Florence Pinton (Agro-Paris-Tech), Augusto Postigo* (Unicamp), Rafael Luís Galdini Raimundo* (Unicamp), José Onésio Ramos* (Unicamp), Roberto Rezende* (Unicamp), Roberta Rizzi* (Unicamp), Pascale de Robert (IRD), Laura Santonieri* (Unicamp), Juliana Santilli* (Ministère public-DF), Maira Smith* (UnB), Lucia van Velthem (MPEG).

* : l'astérisque indique la réalisation de travaux dans le cadre d'un master et/ou d'un doctorat.

16

Système alimentaire

Le terme de « système alimentaire » recouvre la diversité des plantes et des animaux à la base de l'alimentation, mais aussi les techniques culinaires, les ustensiles de cuisine, les manières de manger, ainsi que le système mental associé aux préparations et aux dégustations, comme la conception des saveurs et des odeurs. L'évolution du système alimentaire peut être considérée comme un témoin des profondes transformations en cours.

Contexte

Au cours des dernières décennies, les pratiques alimentaires en Amérique latine, du champ à l'assiette en passant par la cuisine, ont beaucoup changé et de nouveaux problèmes liés à la malnutrition des populations vulnérables et à la qualité des aliments produits sont apparus. Certaines dynamiques sont invoquées de manière récurrente comme causes : la tendance à adopter des aliments mondialisés, la manière dont les aliments sont traités industriellement, la manière dont nous mangeons... Le Brésil n'a pas échappé à ces transformations majeures, même dans ses régions apparemment les plus « éloignées » et difficiles d'accès, comme l'Amazonie.

Comprendre comment ces processus globaux se manifestent au niveau local a motivé une équipe de scientifiques de diverses disciplines à étudier les systèmes alimentaires de l'Amazonie brésilienne. Deux études ont été menées : l'une dans le haut Juruá, dans l'État d'Acre, auprès d'anciens seringueiros d'origine nordestine ; l'autre, plus approfondie, sur le moyen Rio Negro, dans la petite ville pluri-ethnique de Santa Isabel, située à environ 800 km en amont de Manaus, et dans des communautés environnantes, principalement auprès d'Amérindiens des groupes linguistiques arawak et tukano oriental. Les publications concernant l'alimentation en Amazonie étaient et sont encore peu nombreuses, celles traitant des changements alimentaires dans cette région le sont moins encore.

L'alimentation des peuples indigènes d'Amazonie : exemple du Rio negro

Cette recherche dans le Rio Negro, menée de 2006 à 2019, a été une aventure humaine d'observation et de patience. Pendant chaque période de



Préparation de la boisson d'açaí (Santa Isabel do Rio Negro, Amazonas, Amazonie brésilienne).



Tubercules de manioc mis à rouir, Rio Negro, Brésil.

terrain, les chercheurs du projet ont mené des observations et des entretiens auprès des habitants, les accompagnant dans leurs activités quotidiennes.

L'alimentation traditionnelle de la région est basée sur le manioc amer, pilier de l'abattis, et sur le poisson et elle est complétée par du gibier, des insectes, des fruits et des tubercules cultivés et sauvages. La diversité des plantes alimentaires cultivées est considérable : plus de 100 espèces, y compris 50 espèces de fruits, 10 de palmiers et près de 40 espèces annuelles. Le manioc se décline en au moins une centaine de variétés, et l'agrobiodiversité des piments, des ignames, des ananas et des bananes est également étendue. Les forêts de la région sont riches en arbres à noix et à fruits. Les « eaux noires » du Rio Negro sont moins abondantes en poisson que les « eaux blanches » d'autres fleuves, tel l'Amazone, mais témoignent d'une grande biodiversité. Les habitants de Santa Isabel consomment au moins 30 espèces de poisson, ainsi que des tortues de rivière.

Pour parler d'alimentation, il faut être inclusif : bien que les ingrédients, qui proviennent de la biodiversité des plantes et des animaux, soient la base alimentaire, se limiter à eux donnerait une image incomplète sans les techniques culinaires, les modes de consommation ainsi que le système mental

PARTENAIRES

Université d'État de Campinas
(Unicamp), Brésil

Association des communautés
indigènes du moyen Rio Negro
(ACIMRN), Brésil

associé aux préparations et aux dégustations, comme la conception des saveurs et des odeurs, d'où le terme de système alimentaire, qui prend en compte toutes ces dimensions.

L'agriculture traditionnelle du Rio Negro, aux mains des femmes, a comme élément structurant le manioc amer, qui nécessite un processus complexe de détoxification pour devenir comestible, et à partir duquel une grande variété d'aliments est préparée : *farinha* (« farine »), *beiju* (cassave), *goma* (fécule), *tapioca*, *mingau* (bouillie), *manicuera* (liquide extrait du tubercule râpé, longuement cuit pour être détoxifié), *tucupi* (*manicuera* concentrée et légèrement fermentée), *caxiri* (boisson fermentée), *manisoba* (feuilles), avec toute une variété de *farinha*, *beiju*, *mingau* et *caxiri*.



La hotte de portage, ici un *waturá* baré, est un élément de la culture matérielle amérindienne du Rio Negro. Santa Isabel do Rio Negro, abattis de Maria de Sousa Lima, 24/11/2014.

L'autre ingrédient de base est le poisson, principalement pêché par les hommes. Il est préparé bouilli, grillé, frit et en *piracui* (grillé et pilé). Le plat le plus typique de Rio Negro est la *quinhapira* (bouillon de poisson fortement pimenté). Dans les communautés amérindiennes du haut Rio Negro, on mange le matin du *mingau* et/ou de la *quinhapira* avec du *beiju*, et à nouveau de la *quinhapira* en fin d'après-midi, au retour de la pêche ou de l'abattis. Toutes les familles mangent ensemble, partageant tous les plats que chaque femme a préparés. Dans les communautés autour de Santa Isabel, ce partage des plats se pratique encore le dimanche, mais il est beaucoup plus rare en ville. Le rythme des repas y est plus marqué par les activités scolaires ou salariales, car les personnes qui vont pêcher ou se rendent à l'abattis ne sont plus majoritaires. La *quinhapira* est moins fréquemment consommée, et la farine de manioc a pris plus d'importance que le *beiju*. On peut en effet en préparer une grande quantité à la fois, la conserver pendant plusieurs mois et l'emporter avec soi en déplacement, en forêt par exemple. Son emploi a été favorisé par l'extractivisme qui, dans le moyen Rio Negro, a été pendant longtemps la principale activité économique. Par ailleurs, à la farine de manioc viennent aujourd'hui s'ajouter le riz et les haricots, base de l'alimentation dans la majeure partie du Brésil. Le poisson n'est plus toujours consommé au quotidien et on mange aussi du poulet ou du bœuf, importés congelés d'autres régions.

Quelle est l'évolution de ce système alimentaire ?

Cette question est fondamentale dans le contexte des grandes transformations sociales, économiques et environnementales que l'Amazonie a connues au cours des dernières décennies. L'urbanisation, notamment, a une forte incidence sur l'agriculture et la pêche. Il y a de moins en moins d'espace près de la ville pour les abattis, et la croissance démographique et la pression sur la ressource obligent les pêcheurs à aller plus loin pour trouver du poisson.

D'autre part, les aliments produits localement sont peu vendus en ville où, dans les magasins, on trouve surtout des aliments industriels, ainsi que des fruits et légumes tels que des pommes, des tomates ou des oignons, qui arrivent par bateau de Manaus.

Les menus proposés par les restaurants suivent le concept de l'alimentation « nationale », avec du riz, des haricots, des pâtes, de la viande, de la salade ; néanmoins, la farine de manioc est toujours présente et on y propose aussi du poisson, mais rarement des plats régionaux, comme la *quinhapira*. En



Cuisson de la farine de poisson (*piracui*) dans le Lago Grande de Curuai, Amazonie, Brésil.

d'autres termes, la nourriture locale est rendue invisible, ce qui entraîne souvent sa dévalorisation par les Amérindiens eux-mêmes. À Santa Isabel do Rio Negro, environ un tiers des familles continuent à cultiver un abattis autour de la ville, mais il s'agit d'une activité qui est principalement pratiquée par des femmes d'un certain âge et qui a peu d'attrait pour les jeunes. L'alimentation peut être considérée comme un témoin des profondes transformations en cours. C'est dans ce contexte qu'est née l'idée de la patrimonialisation du système agricole traditionnel du Rio Negro, dans lequel a été intégré le système alimentaire.

La patrimonialisation du « système alimentaire »

Qu'est-ce que le patrimoine alimentaire ? Ce patrimoine englobe des dimensions matérielles – les ingrédients issus de plantes et d'animaux et les ustensiles culinaires – et immatérielles – les savoirs, les pratiques, les rituels, les relations sociales, les traditions orales, les aspects identitaires liés à l'alimentation.

L'IPHAN (Institut du patrimoine historique et artistique national du Brésil), qui suit la convention de l'Unesco sur le Patrimoine culturel immatériel, a

patrimonialisé en 2010 le système agricole traditionnel du Rio Negro (qui inclut le système alimentaire) dans la section « Savoirs ». Ce dossier est issu d'un effort conjoint dans lequel les chercheurs, les ONG et, surtout, les membres des associations amérindiennes ont travaillé main dans la main.

Dans le contexte mondial des changements alimentaires, avec une plus grande incidence des maladies liées à la « malbouffe », cette revalorisation d'une alimentation locale, moins transformée et plus nutritive peut être considérée comme un exemple à suivre. En outre, les connaissances traditionnelles, l'alimentation et l'écosystème cultivé et sauvage sont rendus visibles, soulignant l'histoire culturelle de l'Amazonie qui lie étroitement les peuples autochtones et leurs territoires ; un élément clé pour faire face aux défis socio-économiques et environnementaux actuels et à venir.



Fabrication de la farine de manioc, Amazonie brésilienne.

Pour en savoir plus

CARNEIRO DA CUNHA M. *et al.*, 2021 – *Povos tradicionais e biodiversidade no Brasil: contribuições dos povos indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais para a biodiversidade, políticas e ameaças*. São Paulo, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), 278 p.

HUSSAK VAN VELTHEM L., EMPERAIRE L., 2016 – *Manivas aturás beijus: o Sistema Agrícola Tradicional do Rio Negro. Patrimônio Cultural do Brasil*. Santa Isabel do Rio Negro, Associação das Comunidades Indígenas do Médio Rio Negro (ACIMRN), 72 p.

KATZ E. *et al.*, 2016 – « Valorisation des cuisines amérindiennes dans les Amériques : fêtes, foires, et festivals ». In Tibeiro M. L. (ed.) *et al.* : *Livro de atas : Alimentos e manifestações culturais tradicionais. Alimentação e cultura : tradição e inovação na produção e consumo de alimentos*, Vila Real, UTAD : 249-259.

Ont participé aux recherches

Esther Katz (IRD), Lucia Van Velthem (Museu Paraense Emilio Goeldi), Laure Empeaire (IRD).

17

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

Alors que la présence de l'homme vient perturber les équilibres des écosystèmes, des solutions doivent être trouvées pour augmenter la production des zones cultivées, tout en diminuant les intrants et la main-d'œuvre, pour nourrir la population humaine en constante augmentation. Le maintien des espèces natives utiles dans les cultures est un moyen d'atteindre cet objectif tout en conservant la biodiversité.

Contexte

C'est en 1979 que l'Orstom/IRD a affecté son premier chercheur à l'Institut national de recherches amazoniennes (INPA) à Manaus. Des recherches, entre autres en botanique, écologie et pédologie, se sont succédé en Amazonie, au travers de nombreuses missions de chercheurs, professeurs, étudiants français et brésiliens qui sont venus en appui aux équipes sur place. En 1993, une collaboration avec l'université fédérale du Pará (UFPA) et l'université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra) à Belém a permis le démarrage dans l'État du Pará de projets associant l'étude des sols et de la végétation, auxquels ont succédé plus récemment des projets sur la biodiversité. Depuis 2013, une collaboration a aussi débuté avec l'université fédérale du Sud et Sud-Est du Pará (Unifesspa) à Marabá. Avec ces universités, nous nous sommes centrés sur l'étude de zones occupées par l'agriculture familiale.

L'évaluation de la biodiversité en zone tropicale humide est au centre des préoccupations internationales, c'est pourquoi les chercheurs de l'IRD et leurs collègues brésiliens ont développé des recherches sur l'évaluation de la biodiversité sauvage des agrosystèmes, et de la part utile de cette biodiversité dans la communauté de Benfica, aussi dénommé PA-Benfica (*Projeto de Assentamento Benfica*). Ce projet d'installation de petits agriculteurs concerne un territoire précédemment occupé par de grandes propriétés qui ne l'avaient que partiellement défriché.

Comme d'autres régions du Brésil, la région de Marabá dans l'État du Pará, où se situe le PA-Benfica, se caractérise par la présence de fronts pionniers plus ou moins anciens. Une forêt dense humide à forte biodiversité couvrait initia-



Mesure de la couronne d'un palmier *babaçu* dans un pâturage du PA-Benfica, Brésil.

lement les terres. L'installation des agriculteurs s'est traduite par une modification progressive du paysage. En effet, chaque année, ceux-ci choisissent une portion de leurs terres forestières et effectuent le nettoyage du sous-bois, la coupe des grands arbres et le brûlis. Une fois le terrain préparé, soit ils plantent du riz puis du fourrage, soit ils plantent directement le fourrage. Chez les petits agriculteurs familiaux, avec lesquels nous avons travaillé, la culture est manuelle, sans utilisation de tracteurs. Cependant l'usage d'herbicides, peu répandu jusqu'à ces dernières années, est devenu de plus en plus courant.

Entre 1987 et 2005, le paysage de la localité a donc subi d'intenses transformations dues au changement d'utilisation des terres. Il est passé d'un paysage forestier à une mosaïque de parcelles agricoles et notamment de pâturages, actuellement dominants. Certaines parcelles peuvent devenir improductives en raison de l'appauvrissement des sols qui ne reçoivent aucun engrais. Ces espaces sont temporairement abandonnés et entament alors un processus de régénération naturelle par le biais de la succession végétale, qui mène à un espace en friche. Une forêt secondaire se reconstitue et se maintiendra pendant une période plus ou moins longue. Elle pourra à nouveau être coupée et transformée en un nouveau champ agricole.

La région est connue sous le nom de « *Polígono dos castanhais* », en raison de la forte concentration de noyers du Brésil (*Bertholletia excelsa* H. B. K.) dans les forêts « primaires » – c'est-à-dire des forêts anciennes, matures,

PARTENAIRES

Institut national de recherches amazoniennes (INPA), Brésil

Université fédérale du Pará (UFPA), Brésil

Université fédérale rurale d'Amazonas (Ufra), Brésil

Université fédérale du Sud et Sud-Est du Pará (Unifesspa), Brésil

Musée Emílio Goeldi de l'État du Pará (MPEG), Brésil

Institut national de la recherche agronomique (Inra), France

Université de Montpellier (UM), France

Université Paul-Valéry (UPV), France



Palmier *babaçu* et *castanheira*
(noyer d'Amazonie),
Amazonie brésilienne.

qui de mémoire d'homme n'ont jamais été défrichées – dont la densité a malheureusement diminué de manière significative sur le PA-Benfica. Dans cette région, les forêts primaires bien préservées présentent une grande richesse d'espèces typiques de ces milieux. L'exploitation du bois en forêt est, avec l'agriculture, la principale activité à l'origine de leur dégradation. On peut percevoir au moins trois niveaux différents de dégradation des forêts : les forêts bien conservées, où l'on trouve des espèces typiques des forêts humides non perturbées ; les forêts perturbées, avec la dominance d'espèces forestières typiques du sous-bois, mais avec une canopée pauvre en espèces du fait de l'extraction de bois plus ou moins précieux ; les forêts récemment perturbées, avec des traces de brûlis et la présence marquée d'espèces d'arbres pionniers. Les agriculteurs utilisent ces zones forestières riches en biodiversité pour la chasse, la récolte de fruits, de graines et de bois.

Les forêts riveraines, pourtant protégées par la loi n° 4771 de 2012 du Code forestier brésilien, sont aussi parfois défrichées, notamment pour ouvrir des chemins permettant au bétail de s'abreuver ou pour aménager des zones de loisirs. Celles adjacentes aux pâturages présentent le degré de dégradation le plus élevé. Le palmier *açaí* (*Euterpe oleracea* Mart.) est une espèce typique de ces forêts. Cette espèce profite souvent des clairières résultant de l'exploitation forestière pour se développer et devenir presque mono-dominante. Le fruit de l'*açaí* est consommé par la population locale et vendu dans les commerces d'Itupiranga et Marabá. Parfois, les formations à *açaís* de ces zones, localement appelées *açaizais*, font l'objet de coupes pour la récolte du cœur de palmier. C'est lors de ces perturbations que la *taboa* (*Typha dominguensis* Pers.), une espèce herbacée répandue pratiquement partout sur la planète, devient envahissante et ralentit fortement l'écoulement des eaux, allant parfois jusqu'à assécher les bas-fonds.

Comment mène-t-on cette recherche ?

Après un premier contact avec les dirigeants du syndicat des agriculteurs, une réunion avec la population locale a permis d'échanger autour de la recherche qui devait être menée et de s'entendre avec les agriculteurs favorables à une collaboration dans leurs propriétés. La visite de ces propriétés a permis de sélectionner les parcelles à étudier : les cultures de riz, les pâturages, les forêts « primaires », les forêts secondaires et les forêts galeries. Les propriétaires ont fourni des informations sur l'historique de chaque parcelle : l'année du défrichement de la forêt, la date de la plantation de la culture vivrière ou des pâturages, les pratiques culturales (feux, nettoyages, éventuellement herbicides), la date de l'abandon de la culture dans le cas des forêts secondaires, etc. Ces informations ont été indispensables pour interpréter les données relevées sur chaque parcelle.

Les relevés de terrain mobilisent une petite équipe de 3 à 6 personnes. Un transect est matérialisé sur le terrain à l'aide de décimètres, de piquets et de cordes, et tous les végétaux présents sont mesurés, décrits et identifiés. L'identification des plantes commencée sur le terrain est ensuite confirmée dans les herbiers, en particulier l'herbier João Murça Pires du musée Emílio Goeldi de l'État du Pará (MPEG), où les échantillons présentant des fleurs ou des fruits sont déposés. Des images satellitaires sont également utilisées pour caractériser les types d'occupation du sol et repérer les palmiers.

Que peut-on dire sur la biodiversité dans ce contexte ?

Une question souvent posée est la suivante : est-ce que la biodiversité diminue quand on passe de la forêt non perturbée à une culture ou à un pâturage ? Malgré les apparences, lors du défrichage et du brûlis de la forêt humide par l'agriculture familiale non mécanisée, une partie du potentiel végétal est conservée. Il s'agit des graines présentes dans le sol (banque de graines du sol) et suffisamment enterrées pour que la chaleur du feu ne puisse pas les atteindre, et des parties souterraines de certaines plantes qui repoussent après destruction des parties aériennes. Ainsi, dans les champs cultivés et les pâturages, la végétation sauvage se développe parfois très rapidement à partir de ce potentiel d'espèces issu des tiges souterraines, des racines, des graines, provenant de la végétation initiale, la forêt « primaire ». Dans la banque de graines du sol se trouvent aussi des espèces provenant de milieux ouverts non forestiers situés à proximité de la forêt et dont les semences ont pénétré dans le milieu forestier, transportées involontairement par des animaux ou même par l'homme et qui se sont accumulées dans le sol au fil du temps. Ces semences à longue durée de vie ont la capacité d'attendre, dans le sol de la forêt, les conditions de luminosité favorables à leur germination, comme la chute d'une branche, d'un arbre ou un défrichage.

Dans un champ de riz nouvellement installé après défrichage de la forêt humide, on ne démarre donc pas de zéro, mais d'un ensemble d'espèces particulièrement résistantes à l'action anthropique modérée (défrichage manuel et brûlis). Dans les pâturages, qui succèdent souvent à la culture du riz, les adventices entrent en concurrence avec la fourragère plantée. Cette biodiversité, bien qu'importante, est inférieure à celle de la forêt. On y rencontre des plantules et des stades jeunes d'espèces herbacées, de lianes, de palmiers, d'arbustes et d'arbres qui se développent plus ou moins rapidement. Durant la période de culture, cet ensemble d'adventices est soumis aux pratiques culturales : nettoyages manuels, et parfois brûlis, effectués par les agriculteurs pour limiter la concurrence avec les espèces cultivées. La durée de la période de culture influence la biodiversité des parcelles. En effet, certaines espèces, notamment celles issues de la forêt initiale, résistent plus ou moins longtemps dans ces milieux ouverts. Au cours du temps, dans les parcelles cultivées, on assiste à un remplacement des espèces ligneuses (lianes ligneuses, arbustes et arbres) par des espèces herbacées.

Pour diverses raisons, il peut arriver que des parcelles agricoles soient abandonnées plus ou moins rapidement, avec ou sans reprise ultérieure de l'activité agricole. Dans celles-ci, la régénération forestière commence selon un potentiel initial différent, fortement lié à la durée de l'utilisation et aux pratiques culturales durant la période agricole. Elle est aussi influencée par la présence, aux alentours, d'une proportion suffisante de forêts bien conservées et de milieux ouverts fournisseurs de semences. Dans toutes les phases de la succession secondaire et jusque dans les forêts secondaires étudiées du PA-Benfica, les espèces forestières ont été représentées par un nombre d'individus plus élevé que les espèces pionnières, probablement en raison de la forte influence des forêts matures restantes et du fait que le changement d'utilisation des terres dans la localité soit récent.



Récolte de fruits de *babaçu* sous le palmier adulte par une famille habitant le PA-Benfica, Brésil.

Dans le cas de notre étude, la biodiversité végétale diminue quand la forêt est dégradée ou défrichée pour faire place à une culture ou un pâturage, et sa diminution est d'autant plus forte que le temps de culture et de pâture est long.

Une autre question qui se pose est de savoir si l'on peut conserver une biodiversité utile tout en prévenant l'invasion.

Parmi les espèces issues de la végétation initiale forestière ou de formations secondaires qui sont présentes dans les milieux ouverts, certaines sont utiles à l'homme. Elles fournissent du bois d'œuvre, des fruits, des aliments pour le bétail, elles sont médicinales ou permettent la confection d'objets divers destinés à l'usage domestique ou à la vente. Dans les pâturages des petits agriculteurs familiaux, ces espèces utiles sont nombreuses. En effet, le bétail ne consomme pas seulement l'espèce fourragère plantée, mais aussi 110 espèces d'adventices, dont plus d'un cinquième est constitué de légumineuses sauvages. Dans ces pâturages existent également des arbres et des palmiers, dont certains ont été conservés par les agriculteurs au moment du défrichage et d'autres se sont développés au cours du temps. Parmi les 71 espèces d'arbres et de palmiers observées, 9 espèces sont particulièrement intéressantes, car elles présentent des usages multiples. Résistantes au feu, elles persistent dans les pâturages, même anciens. L'avantage pour les agriculteurs est que ces espèces sont naturellement présentes. Ici pas de préparation de terrain, de plantation, ni d'entretien, il suffit de les reconnaître et de ne pas les couper pour pouvoir les utiliser le moment venu. Elles pourraient ainsi être facilement conservées par tous et permettre une augmentation de la biodiversité des pâturages.

Le palmier *babaçu* (*Attalea speciosa* Mart. ex Spreng.) est l'une de ces neuf espèces. Il a une place particulière, car il est à la fois utile à plusieurs titres et envahissant. Les femmes (*quebradeiras de coco babaçu*) le récoltent pour en extraire les semences et produire de l'huile en cassant le fruit. Mais cet usage n'est pas le seul. En effet, plus de 60 utilisations ont été relatées pour cette espèce dans la littérature, dont 14 dans la communauté dans laquelle l'étude a été menée. On peut citer l'utilisation de la pulpe du fruit comme farine, des semences fraîches comme lait végétal, des feuilles pour la couverture des toits, du stipe (faux tronc des palmiers) comme matériel de construction, etc. Ce palmier est sur le plan économique l'une des principales espèces non ligneuses du Brésil exploitées dans le cadre de l'extractivisme – francisation du terme portugais *extrativismo*, qui est une activité de collecte suivie de commercialisation d'espèces sauvages, non cultivées – et sa production d'huile est répertoriée annuellement par l'Institut brésilien de géographie et de statistique (IBGE). Sur le plan social, elle est aussi au centre d'un important mouvement de revendication des casseuses de noix de *babaçu* pour l'accès libre à ce palmier, situé sur les terres de grands propriétaires terriens ou d'agriculteurs familiaux.

Cependant, cette espèce a aussi la particularité de proliférer dans les milieux ouverts et elle est ainsi considérée comme envahissante. Lors du défrichage initial de la forêt primaire, alors que les individus adultes les plus hauts sont abattus, les individus adultes de taille moyenne sont conservés, comme pour d'autres palmiers utiles. Dans les cultures vivrières et les pâturages, les nettoyages manuels périodiques effectués par les agriculteurs sur les jeunes individus de *babaçu* n'affectent pas leur survie, car la lame de la faux ou le

passage du feu, qui éliminent seulement les feuilles sans atteindre la tige souterraine, ne font que ralentir sa croissance. Ainsi, seulement quelques jours après le brûlis, cette espèce est la première à produire de nouvelles feuilles. En revanche, les individus plus âgés ont une tige aérienne, ce qui les rend vulnérables, car ils sont éliminés lorsque cette dernière est coupée. Les individus adultes produisent de nombreux fruits qui tombent sous les pieds mère et sont dispersés par les animaux sauvages tels que l'agouti ou la paca, qui consomment leur pulpe, mais aussi par le bétail et parfois involontairement par l'homme. À cette occasion, il peut arriver que les fruits soient enterrés et cela protège les semences de la destruction par exposition au soleil et aux brûlis, et favorise la germination. Cette espèce se développe plus rapidement dans les pâturages, où elle bénéficie d'une plus forte luminosité que dans la forêt primaire, où les jeunes individus sont à l'ombre des grands arbres. Ainsi, la littérature nous informe que, dans les pâturages, elle devient fertile et donc adulte au bout de 8 à 12 ans, alors qu'en forêt il faut attendre 70 ans. Dans les pâturages, les palmiers adultes sont exposés au soleil, ils n'ont pas besoin d'investir dans la production d'un stipe très haut, alors que ceux qui ont poussé en forêt doivent atteindre la canopée pour profiter d'une plus forte intensité lumineuse. En pâturage, leurs stipes moins hauts sont aussi plus larges que ceux des forêts. Cette dynamique de population plus rapide en pâturage qu'en forêt peut aboutir, dans certains cas, à l'envahissement des parcelles et à l'élimination de la plante cultivée, à tel point que certains agriculteurs abandonnent ces zones, qui se transforment en forêts secondaires presque uniquement composées de palmiers *babaçu*.

Ces dernières années, les agriculteurs ont pris conscience de la forte capacité de ce palmier à envahir les agrosystèmes. Actuellement, les cultivateurs mobilisent des fonds pour couper les individus adultes et éliminer chimiquement les jeunes. Devant cette réalité, et pour éviter la disparition de cette ressource utilisée par les femmes, des recherches sont menées pour comprendre comment cette espèce envahit les zones cultivées, afin d'aboutir à un équilibre entre ce palmier et les cultures tout en préservant au maximum la ressource. Pour cela, les études portent sur la dynamique de population des palmiers *babaçu* et sur la distribution spatiale des adultes. Cette dernière a été étudiée par télédétection sur des images satellitaires à très haute résolution spatiale (inférieure à 1 m).

Par ailleurs, un modèle de dynamique de population de ce palmier a pu être construit à partir des mesures réalisées annuellement sur le terrain sur plus de 6 000 individus à tous les stades de vie (plantules, jeunes et adultes). Ce modèle permet de simuler les évolutions possibles de la population de *babaçu* pour les 5, 10 ou 15 ans à venir avec des prélèvements de fruits allant de 0 à 100 %. Même si tous les fruits sont prélevés, au bout de 15 ans, les adultes continueront à proliférer. Les forts prélèvements de fruits (supérieurs à 75 %) affectent seulement les très jeunes individus. On s'attend à ce que la pression sur la ressource finisse par s'exprimer, même pour les adultes, mais uniquement après de nombreuses années. Ces simulations, en accord avec les informations fournies par les agriculteurs, soulignent la forte résilience du palmier dans ces milieux et expliquent sa capacité à envahir les terres cultivées. Malgré cela, l'étude des images satellitaires montre que les densités d'adultes, à l'échelle de la localité, sont plus faibles dans les pâturages que



Paysage de front pionnier amazonien : en arrière-plan la forêt « primaire », au deuxième plan un pâturage avec prédominance de palmiers *babaçus* jeunes et adultes, au premier plan un pâturage où les palmiers *babaçus* ont été éliminés.

dans la forêt initiale, ce qui est à mettre en lien avec les récentes coupes à blanc de ce palmier. Il est toutefois possible d'observer, sur une infime partie du territoire, des zones abandonnées où cette espèce prolifère sans interférence humaine. L'analyse des images satellitaires combinée aux études sur le terrain permet également de prévoir les potentialités de production à l'échelle d'un territoire. En 2013 par exemple, la production potentielle d'huile des fruits des 25 015 palmiers *babaçu* adultes des milieux ouverts du PA-Benfica a été évaluée à 27,4 t d'huile.

Que peut-on conclure de notre étude ?

En Amazonie, la biodiversité des agrosystèmes des zones récemment ouvertes et cultivées avec des pratiques manuelles et peu d'intrants dépend de la biodiversité initiale des forêts. Dans les parcelles cultivées les espèces provenant de végétations primaires et secondaires sont en mélange et leur présence est influencée par les pratiques culturales. Si la mesure de cette biodiversité est fondamentale, l'identification des facteurs influençant son érosion est également indispensable pour comprendre et enrayer la perte de biodiversité. Parmi ces espèces, certaines sont utiles à l'homme et peuvent apporter des matières premières ou un complément de revenus nécessaire au bien-être des populations locales. Certaines de ces espèces sont à la fois utiles et envahissantes, et les recherches menées permettent de proposer des plans de gestion visant à les contrôler sans les éliminer, pour qu'elles puissent continuer à être utilisées.

De nos jours, alors que la présence de l'homme vient perturber les équilibres des écosystèmes, des solutions doivent être trouvées pour augmenter la production des zones cultivées, tout en diminuant les intrants et la main-d'œuvre, pour nourrir la population humaine en constante augmentation. Le maintien des espèces natives utiles dans les cultures est un moyen parmi d'autres d'atteindre ce but tout en conservant la biodiversité. Face aux problèmes actuels de changement climatiques et de perte de biodiversité, il est urgent de mener de telles recherches sur de nombreuses espèces. Cependant, la réelle mise en pratique des résultats de recherche peut demander du temps.

Dans le pire des scénarios, les résultats peuvent ne pas être mis en pratique, car ils ne correspondent pas toujours aux besoins des sociétés au moment où ils deviennent disponibles. De leur côté, les populations locales ont une grande connaissance de leur milieu, et ce sont elles qui en fin de compte vont agir sur l'environnement en fonction de critères qui leur sont propres et avec les connaissances dont elles disposent. La mobilisation conjointe des compétences des scientifiques et de la société civile permettra une efficacité accrue et une mise en pratique plus rapide des résultats de la recherche en matière de gestion durable des espèces végétales.

Pour en savoir plus

ANDERSON A. B. *et al.*, 1991 – *The Subsidy from Nature: Palm Forests, Peasantry, and Development on an Amazon Frontier*. New York, Columbia University Press, 233 p.

ARAÚJO R. F., LOPES M. A., 2012 – Diversity of use and local knowledge of palms (Arecaceae) in eastern Amazonia. *Biodiversity Conservation*, 21 : 487-501.

COELHO R. D. F. R. *et al.*, 2013 – Conservação das florestas do projeto de assentamento Benfica, sudeste da Amazônia. *Ciência Florestal*, 23 : 1-17.

MITJA D. *et al.*, 2018 – Satellite Images Combined with Field Data Reveal Negative Changes in the Distribution of Babassu Palms after Clearing off Amazonian Forests. *Environmental Management*, 56 : 1-16.

PIVELLO V. R. *et al.*, 2018 – Thinking about super-dominant populations of native species – Examples from Brazil. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 16 : 74-82.

SANTOS A. M., MITJA D., 2011 – Pastagens arborizadas no projeto de assentamento Benfica, Município de Itupiranga, Pará, Brasil. *Revista Árvore*, 35 : 919-930.

SANTOS A. M. *et al.*, 2017 – Estimating babassu palm density using automatic palm tree detection with very high spatial resolution satellite images. *Journal of Environmental Management*, 193 : 40-51.

Ont participé aux recherches

Izildinha Souza Miranda (Ufra), Danielle Mitja (IRD), Roberto Barbosa Dos Santos (UFPA), Sébastien Barot (IRD), Deurival da Costa Carvalho (agriculteur), Eric Delaître (IRD), Laurent Demagistri (IRD), Thierry Desjardins (IRD), Jean-Louis Guillaumet (IRD), Roberta de Fátima Rodriguez Coelho (Ufra, IFPA), Wilson Filguera Batista Júnior (Ufra, MPEG), Bénédicte Fontes (Montpellier SupAgro), Michel Grimaldi (IRD), Deiane Jorge Macedo (UFPA, UM et UPVD), Anne Elisabeth Laques (IRD), Marcos Antônio Leite Silva (Ufra, MPEG), Thérèse Libourel (université de Montpellier), Patrick Lavelle (IRD), Patrice Loisel (Inra), Charlotte Maquet (IRD, UPVD), Paulo Fernando Martins (UFPA, Ufra), Jessica Anastacia Medeiros dos Reis (Ufra), Guy D. Meija (UnB), Alessio Moreira Dos Santos (Unifesspa, Ufra), Sandra Maria Neiva Sampaio (Embrapa, Ufra), Michel Petit (IRD), Hervé Rey (Cirad), Pascale de Robert (IRD), Márcia Nazaré Rodrigues Barros (Ufra), Tânia dos Santos Silva (Ufra), Max Sarrazin (IRD), Nikolay Sirakov (UM, Inra), Luciano Souza da Silva (Ufra), Maria Regina Teixeira da Rocha (Unitins), Jean-François Tourrand (Cirad).

18

Déforestation, orpaillage et mercure

Les émissions de mercure provenant de l'extraction de l'or ont suscité de plus en plus d'inquiétudes au cours des deux dernières décennies, en raison de trois aspects majeurs de son cycle biogéochimique : sa permanence dans l'environnement, son transport atmosphérique sur de très longues distances et sa capacité de bio-accumulation et de bio-amplification.

Contexte

Le bassin amazonien est régulièrement mis en avant pour les problèmes environnementaux et de santé humaine générés par les activités anthropiques. Au cours des deux dernières décennies, la pollution par le mercure (Hg) résultant de l'exploitation aurifère illégale dans les pays d'Amérique du Sud a augmenté et elle est devenue la principale cause d'importantes émissions de vapeurs dans l'atmosphère et de rejet de mercure dans les cours d'eau. Le mercure est un élément naturel utilisé dans une grande variété de processus et de produits. Le mercure ne pouvant se dégrader, ses effets néfastes peuvent affecter les écosystèmes pendant des décennies. Il est donc considéré comme un polluant persistant et il est présent dans les sols et les sédiments, l'atmosphère, l'eau douce et l'eau salée, les poissons, la faune et le corps humain. L'Organisation mondiale de la santé a déclaré que le mercure était l'une des six substances les plus dangereuses pour la santé en raison de sa haute toxicité et des risques qu'il présente pour la santé humaine et l'environnement. Une fois introduit dans l'environnement, le mercure a un cycle biogéochimique complexe et actif. Ses effets néfastes sur l'environnement et la santé ont attiré l'attention du public dans les années 1950 et 1960, à la suite d'une série de décès et de malformations congénitales inexplicables parmi les habitants de la baie de Minamata, au Japon. Cette catastrophe a conduit à la documentation d'un problème de santé publique (connu sous le nom de maladie de Minamata) lié à l'accumulation chez les patients de méthylmercure, mercure provenant des rejets directs dans l'eau de la baie de Minamata d'une industrie chimique.

L'exploitation aurifère s'est déplacée depuis les régions historiquement importantes, comme les États-Unis, vers un nombre croissant de pays du



Drague d'orpaillage et son remorqueur, à la frontière Bolivie-Brésil. Cette zone est très polluée par les déchets dus à l'exploitation de l'or, et notamment le mercure.



Site minier de Dorlin, au centre de la Guyane.

sud de la planète, principalement à revenus moyens et faibles, dont les pays de la région amazonienne. L'orpaillage en Amazonie a connu un boom dû à la hausse soutenue des cours mondiaux de l'or, qui a débuté dans les années 1980 et a augmenté de 500 % au cours des 15 dernières années. Depuis lors, les opérations illégales d'extraction d'or se sont étendues à tout le bassin amazonien et ont engendré, outre de graves dégradations de l'environnement, de profonds bouleversements dans le fonctionnement des sociétés locales, traditionnelles ou amérindiennes.

On estime que 60 % du mercure utilisé dans l'extraction de l'or est rejeté dans les sols de surface près des lieux d'extraction, tandis que 40 % sont rejetés directement dans les rivières. Le mercure libéré dans les sols et les rivières est absorbé à la surface des particules et transporté sur des centaines de kilomètres en aval. En Amérique latine, les émissions de mercure provenant des activités minières représentent 71 % des émissions totales de cet élément. Plus de 25 % des émissions mondiales de mercure dues aux activités minières illégales se produisent dans le bassin amazonien.

Le mercure, présent naturellement dans l'environnement en petites quantités (éléments-traces), est considéré comme un polluant prioritaire au niveau international. La gestion appropriée du mercure est une préoccupation environnementale mondiale depuis les années 1950, en raison de sa haute

PARTENAIRES

Université de Brasilia (UnB), Brésil

Agence de l'eau du Brésil (ANA)

Service géologique du Brésil (SGB-CPRM)

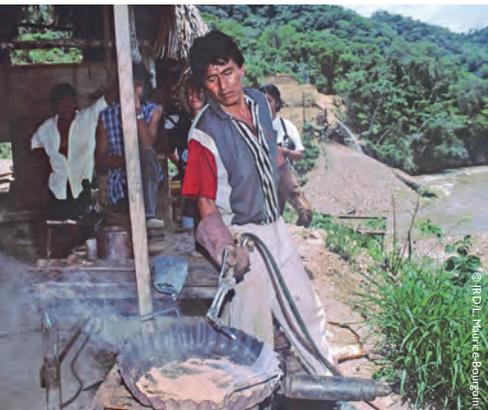
Fondation Oswaldo Cruz, Fiocruz, Brésil

Université fédérale du Pará (UFPA), Brésil

Université fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ), Brésil

Université de São Paulo (USP), Brésil

Université du Québec à Montréal (Uqam), Canada



Brûlage de l'amalgame or/mercure dans une coopérative aurifère de l'Amazonie bolivienne (émission directe de vapeurs de mercure dans l'atmosphère).

toxicité et des risques qu'il représente. Les recherches menées à Minamata, au Japon, ont montré que la bio-accumulation dans la chaîne alimentaire est la principale voie d'exposition de l'homme au mercure, notamment par la consommation de poissons contaminés.

Les émissions de mercure provenant de l'extraction de l'or ont suscité de plus en plus d'inquiétudes au cours des deux dernières décennies, en raison de trois aspects principaux de son cycle biogéochimique : sa permanence dans l'environnement, son transport atmosphérique sur de très longues distances et sa capacité de bio-accumulation et de bio-amplification.

Des études menées dans une approche multidisciplinaire

Cette préoccupation a conduit à de nombreuses études sur la pollution par le mercure dans le monde. À la fin des années 1990, l'IRD s'est engagé dans des recherches menées dans le bassin amazonien sur le sujet. En raison de la complexité du cycle biogéochimique du mercure, de la diversité des sources d'émission et de ses effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine, il s'est avéré indispensable d'intégrer et de développer une approche multidisciplinaire combinant l'hydrologie, la géochimie, les sciences environnementales, la médecine et les sciences humaines et sociales.

En 1995, grâce au programme HyBam (voir chapitre 1) en collaboration avec des universités brésiliennes et boliviennes, les premières mesures du mercure dans l'eau, les sédiments et le sol en Amazonie ont été effectuées. Depuis lors, de nombreuses études ont été réalisées sur la dynamique et les effets du mercure sur les écosystèmes et sur son impact sur la santé humaine.

Les sources d'émissions et de rejets de mercure dans le biome amazonien sont à la fois d'origine naturelle (processus d'altération des roches et combustion de la biomasse) et anthropique (exploitation aurifère). Différents impacts liés à l'exploitation minière illégale sont observés en Amazonie. Le mercure élémentaire liquide est utilisé pour amalgamer les fines particules d'or présentes dans le sol ou les sédiments extraits par les orpailleurs. L'amalgame mercure-or est ensuite chauffé, ce qui induit l'évaporation du mercure et la récupération de l'or. Ce processus entraîne le rejet de vapeurs de mercure dans l'atmosphère. Le mercure peut ensuite se retrouver en suspension dans l'air et contaminer les sols et les cours d'eau par le biais de dépôts secs ou humides lors des précipitations. Les émissions de mercure provenant de l'extraction de l'or se produisent également au niveau local par le biais des déchets déversés sur le sol et dans les masses d'eau.

Les concentrations de mercure mesurées dans l'eau, le sol et les sédiments des bassins du Tapajós et du Madeira montrent que les activités d'extraction de l'or ont accru les émissions naturelles de mercure en raison de l'extraction/remobilisation des sédiments alluviaux et du rejet ultérieur dans la rivière après le processus d'amalgamation et de production d'or. Contrairement à la tendance mondiale de diminution de l'utilisation du mercure dans les processus industriels, les pays amazoniens ont signalé une augmentation des importations totales de mercure depuis 2015.

Même si l'exploitation aurifère est la principale source de mercure en Amazonie, des études montrent que les sols du bassin amazonien, souvent

très anciens (plusieurs milliers d'années), contiennent naturellement de fortes concentrations de mercure à faible mobilité. Le changement d'affectation des sols (déforestation, brûlage, travail du sol) et les processus d'érosion et de perturbation qui en découlent peuvent conduire à une remobilisation du mercure et à sa libération dans les cours d'eau par ruissellement. Il est donc important de comprendre le rôle de la déforestation et de la dégradation des sols qui en résulte dans le cycle du mercure en Amazonie.

Des études dans les *várzeas* (voir chapitre 5) du cours inférieur de l'Amazonie indiquent que le mercure peut être remobilisé dans les lacs de plaine d'inondation. Le même phénomène se produit lors de la construction de grands barrages en Amazonie (par exemple, le barrage de Tucuruí au Brésil). L'interface entre les sédiments du fond du lac et la colonne d'eau sus-jacente est le lieu où les réactions biogéochimiques conduisent à la remobilisation du mercure. Les micro-organismes sont responsables des réactions provoquant la libération du mercure sous forme de méthylmercure biodisponible, facilement assimilé par les organismes vivants. Une fois libérés dans l'eau, les processus d'assimilation par ingestion et de bio-accumulation vont conduire à une augmentation progressive de la concentration de mercure le long de la chaîne trophique. Le mercure va ainsi être transféré et bio-accumulé entre les organismes vivants : macro-invertébrés, crustacés, poissons, oiseaux et mammifères, jusqu'à l'homme, notamment lors de la consommation de poisson.

La consommation de poisson, principale voie d'exposition au mercure

Afin d'alerter les populations locales sur les dangers d'une forte consommation de poisson, il est essentiel de mesurer les concentrations de mercure dans les différentes espèces, car les poissons constituent la source de protéines de qualité et un aliment de base pour plus de 2 millions d'habitants. Par exemple, dans les communautés riveraines du fleuve Tapajós, ces derniers peuvent présenter des niveaux alarmants de contamination au mercure (de 10 à 20 $\mu\text{g/g}$, alors que le niveau acceptable dans les cheveux est de 6 $\mu\text{g/g}$ selon l'OMS). Des études ont montré que la plupart des poissons carnivores contiennent des niveaux élevés de mercure, la plupart dépassant la limite fixée par l'OMS (0,5 $\mu\text{g/g}$ pour les poissons), alors que les poissons herbivores sont bien moins contaminés par le mercure. Une « cartographie » des poissons communément pêchés dans les cours d'eau du bassin amazonien en fonction de leurs concentrations en mercure a été réalisée.

La plupart des études réalisées en Amazonie indiquent une forte corrélation entre la fréquence de la consommation de poisson et les niveaux de méthylmercure mesurés dans les échantillons de cheveux et de sang, et confirment que l'alimentation est la principale voie d'exposition au mercure. L'empoisonnement au mercure provoque des manifestations différentes selon l'âge, par exemple entre enfants et adultes. Les symptômes sont variés et peuvent inclure une irritation de la peau, de la fièvre, des maux de tête, des nausées, des diarrhées, de la fatigue, de l'insomnie, de l'irritabilité, une diminution de l'acuité sensorielle, une cécité, des problèmes rénaux, des pertes de mémoire, des tremblements, des lésions cérébrales et d'autres



Affiche d'informations sur les risques d'imprégnation au mercure en Guyane française.

troubles neurologiques tels que la maladie de Minamata. Les populations les plus exposées au mercure sont les femmes enceintes, les nouveau-nés, les enfants et les adolescents.

Conclusion : un défi pour les années à venir

Des incertitudes existent encore dans nos connaissances sur la biogéochimie du mercure dans les environnements tropicaux, aux échelles régionales et écosystémiques. Il est ainsi compliqué de distinguer et quantifier finement les émissions naturelles et anthropiques de métaux. Il est également difficile de quantifier les émissions liées aux rétroactions d'activités humaines telles que la déforestation. Une des avancées prometteuses pour progresser dans la compréhension du cycle du mercure et d'autres métaux est l'utilisation des isotopes stables. Les isotopes d'un même élément chimique se distinguent par un nombre différent d'éléments (neutrons) dans le noyau. Ils sont dits stables parce que non radioactifs. Les isotopes stables peuvent être utilisés pour tracer les sources de certains éléments comme le mercure. Cette nouvelle voie de recherche devrait permettre de discriminer les sources naturelles et anthropiques du mercure, et d'améliorer notre compréhension de processus post-émissions affectant le devenir, la biodisponibilité et la contamination environnementale et humaine.

Les lacunes dans les informations sur les émissions de mercure sont liées à une insuffisance des réseaux nationaux et régionaux de surveillance dans les différents pays du bassin amazonien (y compris les pays du plateau des Guyanes). L'étude et la lutte contre ce problème environnemental et social sont confrontées aux difficultés d'accès aux zones d'émissions et d'exposition au mercure. Les programmes de contrôle des eaux et des sédiments sont également insuffisants. En général, l'Amazonie est sous-représentée dans les réseaux mondiaux de surveillance du mercure et de production de connaissances. La signature de la convention de Minamata en 2013 a donné un nouvel élan à la réglementation juridique, à l'articulation inter-institutionnelle et à l'établissement d'objectifs communs fondés sur les engagements de la convention. À l'exception du Venezuela, tous les pays dont le territoire se situe dans le biome amazonien, y compris la France, ont signé et ratifié la convention de Minamata et sont en train de créer leurs plans d'action nationaux.

Alors que nous traversons une période inquiétante concernant la déforestation et l'orpaillage en Amazonie, la région est plus que jamais l'objet de nombreux risques environnementaux avérés ou latents. L'actualité récente, marquée par l'augmentation des incendies de forêt et de la déforestation, ainsi que par la « ruée vers l'or sur la rivière Madeira » en novembre 2021 par exemple, nous montre que, malgré les preuves de contamination humaine, les activités d'orpaillage prospèrent de manière alarmante. De plus, de récentes ruptures de barrage dans le Minas Gerais et le déversement de grandes quantités de déchets qui en a résulté ont mis en évidence la fragilité du système de contrôle environnemental. L'urgence de comprendre le devenir et les risques de la pollution au mercure et des autres polluants métalliques dans les écosystèmes tropicaux est un défi pour les années à venir.



Prélèvements d'eau de la rivière Challana, dans le piémont andin bolivien, selon des protocoles ultrapropres, en vue de l'analyse des métaux traces dont le mercure (lavage des bouteilles Téfion dans des bains d'acide, port de gants sans talc à usage unique).

Pour en savoir plus

LACERDA L. D., SALOMONS W., 1998 – *Mercury from gold and silver mining: a chemical time bomb?* Berlín, Springer-Verlag, 147 p.

MARTINELLI L. A. *et al.*, 1988 – Mercury Contamination in the Amazon: A Gold Rush Consequence. *Ambio*, 17 (4) : 252-254. <http://www.jstor.org/stable/4313470>. Accessed 1 Sep. 2022.

ROULET M. *et al.*, 1999 – Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water Air Soil Pollut.*, 112 : 297-313.

Ont participé aux recherches

Jérémie Garnier (UnB), Patrick Seyler (IRD), Marc Roulet (IRD), Marc Lucotte (Uqam), Luiz Drude de Lacerda (université fédérale de Ceará, UFC), Laurence Maurice-Bourgoin (IRD), Jacques Gardon (IRD).

Environnement et santé en Amazonie, une approche One Health

Dans le domaine des relations santé-environnement, l'IRD et ses partenaires font le lien entre l'échelle locale (celle de la prise de décision par les acteurs locaux, en lien avec les spécificités du territoire) et l'échelle globale (celle de la santé globale, essentielle du point de vue de l'évaluation et de la gestion des risques et des crises mondialisés), notamment à travers une problématique peu étudiée, celle de la santé transfrontalière.

PARTENAIRES

Université de Brasilia (UnB), Brésil

Agence régionale de santé (ARS),
Guyane

Ambassade de France au Brésil

Cirad

Collectivité territoriale de Guyane (CTG)

Fiocruz/ICT/LIS,
Institut de communication et information
scientifique en santé, Brésil

Fiocruz/ILMD Fiocruz Amazonas -
Institut de Recherches Leônidas
et Maria Deane, Brésil

Fiocruz/IOC/LDP,
Programme de master et doctorat
en surveillance et contrôle des vecteurs
de l'Institut Oswaldo Cruz, Brésil

Fondation de recherche de l'État
d'Amapá (Fapeap), Brésil

Fondation de recherche de l'État
d'Amazonas (Fapeam), Brésil

Contexte

Selon l'OMS, 24,3 % des décès dans le monde (environ 13,7 millions de décès par an) sont dus à des facteurs environnementaux « modifiables », c'est-à-dire des facteurs liés aux activités humaines ou sur lesquels les humains peuvent agir pour réduire leurs impacts négatifs sur la santé humaine. On peut citer, par exemple, la pollution, la déforestation, ou toute modification de l'environnement et du climat qui peut permettre la création d'habitats favorables aux vecteurs qui transmettent des maladies. Le pourcentage de la charge totale (estimée en années de vie corrigées de l'incapacité [AVCI], une AVCI représentant la perte de l'équivalent d'une année de pleine santé) attribuable à des conditions environnementales modifiables a été estimé à 95 % pour la dengue, 80 % pour le paludisme, 56 % pour la maladie de Chagas et 43 % pour les maladies diarrhéiques. Cela signifie que la grande majorité des cas de ces maladies auraient pu être évités par une meilleure gestion de l'environnement et des terres ou par l'adaptation des comportements vis-à-vis de l'environnement. Ces maladies sont particulièrement présentes dans la région amazonienne : selon l'OMS, 653 000 cas de paludisme (409 décès) ont été enregistrés sur le continent américain en 2020, dont 35 % au Venezuela, 26 % au Brésil et 16 % en Colombie. Au Brésil, 99 % des cas sont enregistrés en Amazonie légale. Par ailleurs, si la situation s'est améliorée dans plusieurs pays de la région, le Brésil a enregistré une stabilité des cas depuis 2015, année où le pays a été élu « champion de la lutte contre le paludisme » par l'OMS/OPS. La diminution attendue ne s'étant pas produite, le pays n'a pas atteint



Prélèvement de sang et enquête « Connaissances, attitudes, pratiques » (CAP), projet de séro-prévalence.

l'objectif intermédiaire de la stratégie mondiale de lutte contre le paludisme (alignée sur les Objectifs de développement durable), qui était de réduire d'au moins 40 % l'incidence de la maladie d'ici 2020. Il est donc difficile d'atteindre l'objectif final, qui est de réduire l'incidence de 90 % en 2030. Cette situation indique qu'il reste beaucoup à faire pour interrompre la transmission du paludisme dans la région amazonienne.

Cependant, la capacité d'étudier les relations entre l'environnement et la santé s'est considérablement accrue au cours des dernières décennies. Le nombre des principaux satellites d'observation de la Terre à moyenne et haute résolution spatiale en exploitation a doublé dans les années 2000, dépassant les 15 satellites en 2011 ; en outre, la résolution spatiale des images obtenues par ces satellites a augmenté d'un facteur 100 entre 1970 et les années 2010, pour passer à moins de 1 m actuellement. Depuis les années 2000, le développement technologique lié à l'acquisition de données environnementales, aux capacités de stockage et de calcul ainsi que l'accès plus facile aux données (notamment celles provenant des satellites) et l'émergence de logiciels gratuits pour la construction de systèmes d'information géographique (SIG) et l'analyse spatiale ont offert de nouvelles opportunités pour étudier les relations complexes entre environnement et santé.

PARTENAIRES

Fondation de recherche de l'État du Maranhon (Fapema), Brésil

Hôpital de Cayenne

Institut de recherches scientifiques et techniques de l'Amapá (IEPA), Brésil

Institut Pasteur de Guyane

Secrétariat municipal à la santé d'Oiapoque, Brésil

Surintendance de la surveillance sanitaire de l'Amapá, Brésil

Université de Brasilia, Centre de médecine tropicale, Brésil

Université de Brasilia, laboratoire de Géographie, Environnement et Santé (Lagas), Brésil

Université fédérale d'Amazonas, Brésil

Université fédérale de l'Amapá, Brésil

Bien que les impacts de l'environnement sur la santé ne soient pas faciles à mesurer, car la dynamique de nombreuses maladies liées à l'environnement est influencée par d'autres facteurs (socio-démographiques, économiques et politiques), ils peuvent être appréhendés par l'étude des contextes environnementaux et la caractérisation des habitats des vecteurs et/ou des réservoirs des agents pathogènes de ces maladies, par exemple. Ainsi, l'abondance des données environnementales satellitaires permet aujourd'hui de caractériser, modéliser, voire prédire l'influence des facteurs environnementaux sur la dynamique de maladies, à différentes échelles temporelles et spatiales, ce qui peut apporter une aide importante dans le contrôle des maladies liées à l'environnement.

Dans ce contexte, l'IRD et ses partenaires se sont intéressés à l'étude des liens entre l'environnement (dont le climat), les facteurs socio-démographiques, les politiques publiques et la situation sanitaire en Amazonie au cours des dernières décennies. L'objectif est d'apporter des connaissances afin de soutenir, spécifier et diversifier les actions de santé publique visant à améliorer les situations sanitaires des populations de la région, en évaluant les impacts relatifs des facteurs environnementaux, socio-démographiques, ou encore liés aux politiques publiques.

Comment fait-on ?

L'IRD et ses partenaires ont adopté dès le départ une approche intégrée des questions de santé. Ce type d'approche est actuellement connu sous le nom de « One Health » et s'est appuyé sur la science de la durabilité, qui est maintenant fortement promue par l'IRD. Le concept One Health est associé à une approche systémique et holistique de la santé, qui prend en compte la santé humaine, mais aussi la santé animale et celle des écosystèmes, tout en considérant les différentes dimensions sociales (culture, économie, politique, etc.), le fonctionnement des systèmes de santé (infrastructures, services, réglementations, etc.) et les interactions entre toutes ces composantes. La science de la durabilité a pour objet d'étude les solutions associées au développement durable et à ses interactions, à travers une approche participative et intégrée, afin de maximiser les impacts positifs et durables et d'éviter les effets négatifs directs et indirects.

Les études réalisées s'appuient, entre autres, sur des données collectées par des organisations et agences nationales et internationales, ou recueillies par des équipes au niveau local. La diversité des problèmes de santé et le caractère multifactoriel des systèmes éco-épidémiologiques qui existent en Amazonie se reflètent dans la diversité des méthodes de collecte de données et d'informations, à travers diverses technologies et à différentes échelles d'espace et de temps.

Les observations sur le terrain vont de la collecte d'insectes vecteurs de maladies (telles que le paludisme et la maladie de Chagas), qui permet de mieux connaître la distribution des vecteurs et le risque de transmission, à l'utilisation de questionnaires de type CAP (qui permettent d'obtenir des données sur les connaissances, les attitudes et les pratiques des populations locales) et l'animation de groupes de discussion (incluant notamment des gestionnaires, des membres d'associations, des représentants communautaires).



Véhicule du projet de séro-prévalence réalisé dans le district fédéral. Ces recherches ont également été menées en Amazonie, dans les villes jumelles de Tabatinga (Brésil, Amazonas) et Leticia (Colombie) (thèse de José-Joaquín Carvajal, projet Gapam-Sentinel).

Les études bénéficient également des données environnementales obtenues par des stations de mesure permanentes, comme les stations de mesure de niveau d'eau des rivières Solimões et Rio Negro, ou les stations météorologiques. Comme les facteurs hydro-climatiques peuvent influencer entre autres la présence et la densité des insectes vecteurs de maladies, et en raison de la faible densité des réseaux de mesure *in situ*, les données satellitaires sont également prises en compte, afin de caractériser les conditions hydro-météorologiques des habitats de ces vecteurs. Les données de télédétection permettent également de caractériser l'occupation des sols et le paysage, de cartographier les habitats écologiques des vecteurs et les habitations humaines, permettant ainsi la création d'indicateurs de risque d'exposition à certaines maladies (comme l'exposition de la population humaine au vecteur du paludisme). Des méthodes développées dans d'autres régions, mais parfaitement applicables en Amazonie, ont également été mises au point, par exemple pour l'estimation de la distribution de la population humaine par détection, afin de mieux cartographier le taux d'incidence des maladies.

Mais il n'y aurait pas d'étude sur la santé humaine sans données sur les cas de maladies étudiées, ce qui a été possible grâce à la robustesse des systèmes d'information brésiliens gérés par le ministère de la Santé et qui ont pour principe de rendre leurs données publiques, par le biais du Système d'information hospitalier (SIH), du Système d'information sur la mortalité (SIM), du Système de surveillance épidémiologique du paludisme (SIVEP-Malária) et du Système d'information des maladies à notification obligatoire (SINAN), entre autres.

Quels sont les principaux résultats ?

À l'IRD, le point de départ d'une approche intégrée de la santé prenant en compte les facteurs environnementaux et la dimension spatiale a été le doctorat d'Helen Gurgel, *Malaria and environmental dynamics in the state of Roraima in Brazil* (2006). En considérant l'environnement (données météorologiques, répartition de la végétation à partir de données satellitaires), les facteurs socio-démographiques et le fonctionnement du système de santé, ce travail aborde la question du paludisme dans l'État du Roraima de manière holistique et systémique, en démontrant que les facteurs n'agissent pas aux mêmes échelles de temps et d'espace, et offre une meilleure compréhension de la maladie, ainsi que des éléments d'aide à la décision pour son contrôle et son élimination.

À la fin des années 2000, le projet « *Poor Land Use, Poor Health* » (PLUPH), codirigé par l'IRD et l'université du Québec à Montréal (Uqam, Canada), a représenté un exemple d'approche intégrée, systémique et participative de la santé humaine et des écosystèmes, la santé humaine n'étant pas seulement considérée comme l'absence de maladie (dans ce cas, la maladie de Chagas et les problèmes de santé résultant de l'exposition au mercure), mais aussi comme la capacité des communautés concernées à produire des aliments de qualité et à générer des revenus commerciaux, conformément à leurs pratiques et à leur culture. Cela répond à la définition de la santé donnée par l'OMS, « un état de complet bien-être physique, mental et social, et pas seulement l'absence de maladie ».



Habitat favorable aux insectes vecteurs de la maladie de Chagas, Amazonie bolivienne.

Ainsi, ce travail a confirmé l'engagement de l'IRD-Bésil et de ses partenaires dans l'approche One Health promue par l'Institut. Cet engagement a été renforcé dans le cadre de divers programmes et projets, comme le LMI OCE, le projet PLUPH, ou encore le projet Relais (Système d'information sur les paysages épidémiologiques en Amazonie, coordonné par l'IRD et l'université fédérale de Rio de Janeiro [UFRJ], 2012-2015), avec notamment l'accueil de plusieurs doctorants brésiliens par l'IRD à Montpellier, en France, dans le cadre du programme Science sans frontières. Par exemple, Markus Fuckner, qui a travaillé sur les relations entre le climat et les maladies diarrhéiques d'origine infectieuse, a mis en évidence des relations distinctes selon les régions du pays, « les périodes de l'année où l'on enregistre le plus grand nombre d'hospitalisations pour diarrhée étant associées de manière prédominante à la saison des pluies dans le Nord/Nord-Est et à la saison sèche dans les régions du Sud-Est/Centre-Ouest, ce qui suppose une variation en fonction de l'étiologie de l'infection, à savoir bactérienne ou virale » ; Bruna Wolfarth a étudié les relations entre la dynamique hydrologique dans le bassin de l'Amazone et le paludisme, montrant, entre autres, que, selon le contexte géographique, le facteur le plus influent est soit les précipitations, soit le niveau d'eau du fleuve, et démontrant ainsi l'importance des méthodes de surveillance du niveau d'eau par satellite pour mieux spatialiser le risque de paludisme en Amazonie ; Missifany Silveira s'est concentrée sur les impacts de la construction de barrages sur la santé, avec un accent particulier mis sur le barrage de Belo Monte, en montrant l'importance des processus participatifs et intégrés (prenant en compte l'environnement, la santé, l'éthique du développement) pour minimiser les effets négatifs de ce type de projets. Leandro Gregório a étudié l'apport des données satellitaires dans la mise en évidence des relations entre expansion ou densification urbaine et dynamique de la dengue. Ces études, parmi d'autres, ont démontré la nécessité de l'approche de la science de la durabilité.

Plusieurs autres travaux ont été développés avec des partenaires brésiliens, et l'IRD contribue de manière significative au renforcement, à la visibilité et à la structuration de la communauté brésilienne de la géographie de la santé, grâce à ses outils de partenariat. Ainsi, en 2013 a été créé le Laboratoire de géographie, environnement et santé (LAGAS) de l'université de Brasilia (UnB), soutenu par l'IRD de 2016 à 2018 à travers la Jeune Équipe Associée à l'IRD (JEA) dénommée « Gestion, indicateurs et territoire : environnement et santé au Brésil » (GITES), une JEA étant un dispositif de l'IRD permettant à une nouvelle équipe d'émerger en tant que laboratoire autonome, sur une question de recherche innovante.

Dans la continuité de la JEA GITES, le laboratoire mixte international (LMI) Sentinela (observatoires transfrontaliers de l'environnement et des maladies vectorielles, sites sentinelles de l'Observatoire brésilien du climat et de la santé) a été créé en 2018 entre l'UnB, la fondation Oswaldo Cruz (Fiocruz) et l'IRD, dans le but de créer un pôle de référence sur les questions liées à la surveillance intégrée et territorialisée en santé, y compris dans les zones transfrontalières, par la recherche, l'enseignement et le dialogue avec les politiques publiques. Outre la publication d'articles scientifiques dans des revues et des congrès, le LMI a contribué à l'encadrement et au soutien de plus de

50 étudiants de licence, master et doctorat, avec une majorité d'étudiants brésiliens (plus de 80 %), mais aussi à l'enseignement dans les domaines de la géographie de la santé, du géotraitement pour la santé, de l'épidémiologie, de la surveillance de la santé, de la santé publique, du géotraitement appliqué à l'écologie des vecteurs, etc. Il a développé et mis en œuvre un système de surveillance du paludisme transfrontalier entre la Guyane française et le Brésil, a contribué à une vaste étude transversale sur les arboviroses dans le district fédéral, avec la collecte d'échantillons sanguins, de réponses à des questionnaires de type CAP et d'informations environnementales. Le LMI a également participé à la surveillance et à l'analyse des tendances de la pandémie de Covid-19 au Brésil et dans les zones transfrontalières (frontière entre la Guyane française et le Brésil ; triple frontière entre la Colombie, le Pérou et le Brésil). Il accompagne les politiques publiques, notamment la mise en place de salles de situation bi- et tri-nationales (ou centres transfrontaliers) pour la surveillance et la réponse épidémiologique, sous la responsabilité, entre autres, du ministère de la Santé, de la surintendance de la surveillance sanitaire de l'Amapá, de la Fondation de surveillance sanitaire de l'Amazonas et de l'Organisation panaméricaine de la santé (OPS).

La JEAI GITES et le LMI Sentinela ont également soutenu l'organisation du symposium national de géographie de la santé de 2015 et du séminaire international « Géographie et santé – théorie et méthode à l'heure actuelle », en 2018, avec la participation de plus de 150 participants chacun. Ils ont également contribué à la publication de deux dossiers thématiques sur la géographie et la santé (l'un sur les concepts théoriques et l'autre sur les applications) dans la revue franco-brésilienne de géographie *Confins*, en 2018 et 2019.

Un autre exemple de coopération entre différents partenaires est la semaine de formation en matière de santé à la frontière, qui a permis de renforcer les compétences sur les données spatialisées et les cartes pour la santé (intérêt, collecte, utilisation, interprétation), ou sur l'utilisation du GPS. Cette semaine a consisté en un atelier de cartographie participative, avec des agents de santé communautaires, des agents de contrôle des maladies endémiques d'Oiapoque, des membres d'ONG, des chercheurs et des gestionnaires de santé du Brésil et de la Guyane française (entre 31 et 35 participants).

En conclusion

L'IRD entend se positionner comme l'un des leaders mondiaux de la promotion de l'approche One Health à des fins de développement durable. Il anime en son sein une « communauté de savoirs » (CoSav) et participe à la coordination de l'initiative internationale Prezode (*Preventing Zoonotic Disease Emergence*) et du programme « The Future of One Health » afin de promouvoir des projets innovants ayant un fort impact social sur la prévention et la gestion des crises sanitaires grâce à l'approche One Health. En Amazonie, l'IRD fait le lien entre l'échelle locale (celle de la prise de décision par les acteurs locaux, en lien avec les spécificités du territoire) et l'échelle globale (celle de la santé globale, échelle essentielle du point de vue de l'évaluation et de la gestion des risques et des crises mondialisées), notamment à travers une problématique peu étudiée, celle de la santé transfrontalière. En ce sens, le LMI Sentinela a co-organisé la session spéciale « *Cross-border health*,



Mission de terrain franco-brésilienne à Oiapoque, Amapá, Brésil, en 2013 pour le choix de sites de capture des moustiques *Anopheles darlingi*, le principal vecteur du paludisme en Amazonie.



Semaine de la formation en matière de santé à la frontière, 2017, à Oiapoque (Brésil, Amapá) et Saint-Georges-de-l'Oyapock (Guyane française).

a neglected global health challenge » lors de la conférence internationale Geomed aux États-Unis, en octobre 2022.

Les études de l'IRD menées en partenariat avec ses partenaires brésiliens contribuent à mieux caractériser, surveiller et prévoir les relations complexes entre l'environnement (y compris le climat), les facteurs socio-démographiques, les systèmes de santé et la santé humaine. Outre de nouvelles méthodes et connaissances, l'IRD contribue également à démontrer la faisabilité de solutions opérationnelles, notamment en ce qui concerne le développement d'observatoires sanitaires locaux et territorialisés, considérés comme des « sites sentinelles » de l'observatoire brésilien du climat et de la santé. Depuis 2019, l'IRD et le LMI Sentinela accompagnent également les politiques publiques en apportant un soutien technico-scientifique dans la mise en place de structures binationales de surveillance et de réponse aux urgences de santé publique aux frontières.

Pourtant, de nombreux défis restent à relever !

La production de données et d'indicateurs pertinents, multifactoriels, intelligibles et utiles pour les acteurs de la santé dans leurs missions de surveillance et de gestion de la santé, et ce de manière systématique, durable et la plus automatique possible, continue de poser des défis scientifiques et technologiques. La réalisation de ces objectifs dans un contexte transnational est encore plus complexe, en raison du manque d'interopérabilité des systèmes d'information, de la non-comparabilité des données, des difficultés à développer et à maintenir une coopération transfrontalière locale et des différences socio-juridiques et économiques entre les pays.

Les solutions impliquent un dialogue permanent entre les disciplines scientifiques (exactes et humaines), entre les secteurs (secteur académique, privé, politiques publiques, société civile...) pour lesquels les approches participatives et communautaires peuvent apporter des solutions variées.

Enfin, un autre défi consiste à concilier la diffusion de données et de connaissances scientifiques à la société (grâce aux principes de la science ouverte, notamment afin de réduire les inégalités en matière de santé et de lutter contre la diffusion de *fake news*) avec le respect des considérations éthiques (notamment la protection des communautés vulnérables) et de la vie privée, qui est une question particulièrement sensible dans le domaine de la santé.

Pour en savoir plus

IRD le Mag' : <https://lemag.ird.fr/fr/le-paludisme-sous-surveillance-transfrontaliere>.

<https://www.soscienc.org/les-programmes-open-innovation/open-innovation-one-health/>

https://prezode.org/prezode_fre/

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240000377>

Ont participé aux recherches

Emmanuel Roux (IRD), Helen Gurgel (UnB), Nadine Dessay (IRD), Thibault Catry (IRD), Christina Romana (université Paris V), Marc Lucotte (Uqam), Naziano Filizola (Ufam), Laurent Durieux (IRD), Anne-Élisabeth Laques (IRD), Paulo Peiter (Fiocruz), Christovam Barcellos (Fiocruz), José-Joaquín Carvajal (Fiocruz), Margarete do Socorro Mendonça Gomes (Surintendance de surveillance en Santé de l'Amapá SVS/AP), Allan Kardec Galardo (IEPA), Eliane Lima e Silva (UnB), Walter Ramalho (UnB).

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 Pélessier, 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 Emilio 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, orpillage 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

Achévé d'imprimer en janvier 2023 par



139 rue Rateau
93120 La Courneuve

N° d'impression : 202301.0013
Dépôt légal : janvier 2023

Imprimé en France



www.editions.ird.fr

Issu d'un travail collectif, cet ouvrage présente les travaux menés en Amazonie brésilienne par l'IRD et ses partenaires depuis plus de trente ans. Les différents thèmes et projets de recherche sont retracés dans une perspective historique et évolutive : d'abord axées sur les inventaires et les connaissances des espèces ou des réseaux hydrologiques, les recherches se sont ensuite ouvertes à la gestion des ressources et à la protection de la biodiversité. Désormais, pour répondre aux enjeux sociaux et environnementaux, les approches disciplinaires s'hybrident, les scientifiques établissent le dialogue et s'engagent auprès des populations locales. Chacun des chapitres met ainsi en lumière le rôle de la science dans la gestion durable des écosystèmes amazoniens et l'accompagnement des politiques publiques. Cette science engagée, impliquée dans le dialogue avec les sociétés, dessine les bases de voies d'adaptation durables en Amazonie brésilienne.