

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,

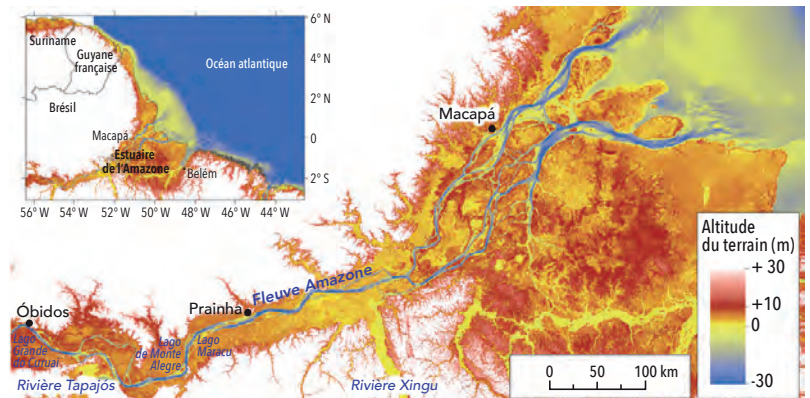
PARTENAIRES

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).

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

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