

Contact: Fabien DURAND (fabien.durand@ird.fr)

Résumé

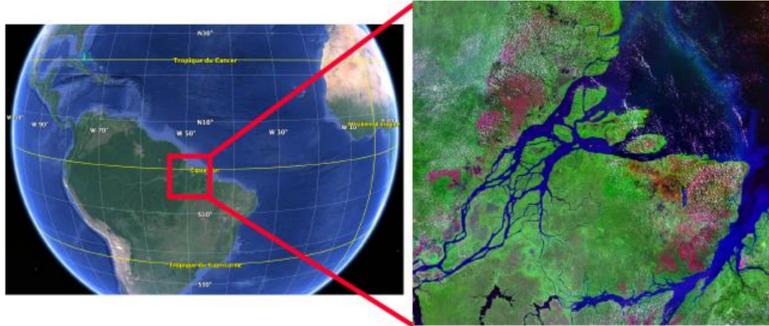


Fig. 1: Localisation de l'estuaire de l'Amazonne

L'estuaire de l'Amazonne décharge le premier débit fluvial vers l'océan, avec 20% des apports globaux. Des travaux historiques ont révélé la variabilité spatio-temporelle de la marée dans cet estuaire macro-tidal, mais son hydrodynamique demeure très mal connue. Dans cette étude, nous analysons la variabilité saisonnière à interannuelle de la marée entre la limite amont de l'estuaire (800 km à l'intérieur des terres) et l'Océan Atlantique, sur la base d'observations marégraphiques in situ et d'un modèle hydrodynamique. Le développement de ce modèle à haute résolution couvrant l'ensemble de l'estuaire ainsi que son delta terminal constitue une première sur cette région. La marée modélisée est confrontée à un jeu de données marégraphiques sur 14 stations réparties le long de l'estuaire. La comparaison montre une erreur consolidée de la marée modélisée de 16 cm en saison d'étiage et 23 cm en saison de crue. La marée semi-diurne est fortement variable à l'échelle saisonnière. La saisonnalité du débit fluvial impacte l'amplitude de la marée, l'étendue de la zone tidale, la vitesse de phase de l'onde de marée ainsi que la renverse du courant de marée. La marée est détectable jusqu'à Óbidos à 800 km en amont de l'embouchure pendant l'étiage, alors que pendant la crue elle disparaît 500 km en amont de l'embouchure. Par ailleurs, la limite amont de la renverse du courant de marée se décale de 170 km entre la crue et l'étiage. Aux échelles interannuelles, les anomalies de débit du fleuve induisent une modulation du marnage qui atteint 30% dans la partie centrale de l'estuaire. Notre étude ouvre la voie vers une meilleure compréhension des mécanismes biogéochimiques et géomorphologiques à l'œuvre sur l'estuaire. Elle présente aussi un potentiel d'utilisation immédiate pour la sécurité de la navigation, et pour l'évaluation de l'aléa submersion sur le continuum amazonien fleuve-estuaire-océan.

Modélisation hydrodynamique

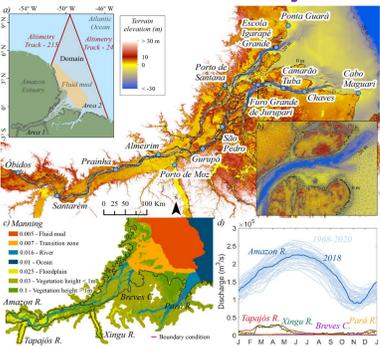


Fig. 2: Bathymétrie et topographie de la zone d'étude avec (a) le domaine modélisé (b) un zoom sur la grille de la zone (c) le coefficient de Manning utilisé (d) les débits fluviaux prescrits aux frontières

Notre modèle s'appuie sur le code numérique SCHISM dans une version barotrope 2DH, forcé par la marée altimétrique Jason aux frontières ouvertes océaniques, et par les débits fluviaux observés aux frontières ouvertes amont. Le domaine modélisé s'étend sur 435000km², de Óbidos à l'amont jusqu'à l'océan profond, avec une résolution variable de 250m dans l'estuaire à 5km dans l'océan hauturier (fig. 2a,b). Il s'appuie sur un atlas topobathymétrique original à 30m de résolution, que nous avons développé par digitalisation de l'ensemble des cartes marines existant sur l'estuaire (500000 points digitalisés). La paramétrisation de la friction de fond prend en compte la région étendue de crème de vase, à faible friction, présente au large de l'embouchure (fig. 2c). La figure 3 montre la validation de la marée modélisée le long des deux bras principaux de l'estuaire, ainsi que du niveau moyen de l'eau. Le modèle capture fidèlement l'amplitude et la phase du constituant dominant M2 de l'aval à l'amont, avec des amplitudes atteignant 2m à l'embouchure. L'erreur complexe considère les constituants dominants (M2, S2, M4 et Mm). L'erreur complexe moyenne est de 16cm en saison d'étiage et 23cm en crue. La phase de M2 s'étend sur deux cycles : à tout instant, l'estuaire contient deux ondes semi-diurnes successives, de l'embouchure jusqu'à l'amont. La représentation fidèle de la pente du niveau moyen, de l'ordre de 1cm/km, suggère que nous ne sommes pas en situation de compensation d'erreur entre la marée et le niveau moyen.

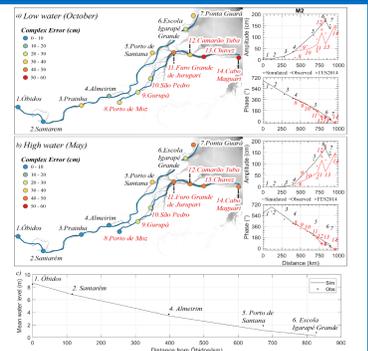


Fig. 3: Erreur complexe de la marée modélisée. A droite, sections d'amplitude et de phase de M2 en étiage (a) et en crue (b). (c) Niveau moyen modélisé (trait plein) et observé (référéncé à EGM08) (points)

Variabilité saisonnière de la marée

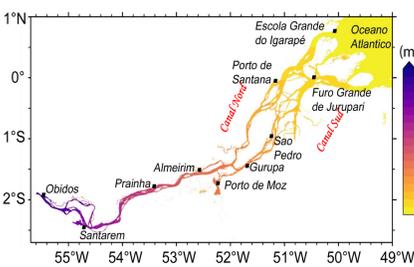


Fig. 4: Niveau moyen modélisé (en m)

Le débit de l'Amazonne est fortement variable, entre 1000000 m³/s en saison d'étiage et 250000m³/s en saison de crue (fig. 2d). En réponse à ce cycle hydrologique, le niveau de l'eau varie également saisonnièrement autour du niveau moyen visible sur la figure 4. L'amplitude saisonnière atteint 6m à l'amont de l'estuaire. La marée répond fortement à ce cycle hydrologique, avec une amplitude beaucoup plus forte en étiage qu'en crue, dans les deux bras de l'estuaire (Fig. 5). Alors que la marée reste observable vers l'amont jusqu'à Óbidos (800km en amont de l'embouchure) en étiage, elle disparaît 300 km plus en aval en saison de crue, en été boréal. Cette variabilité saisonnière diminue vers l'aval et devient insignifiante dans le delta terminal, qui apparaît macrotidal toute l'année.

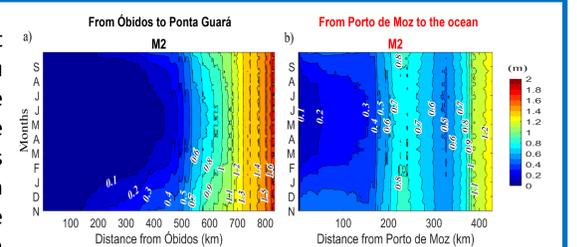


Fig. 5: Evolution saisonnière de l'amplitude de l'onde M2 le long du canal Nord (gauche) et du canal Sud (droite)

Renverse du courant de marée

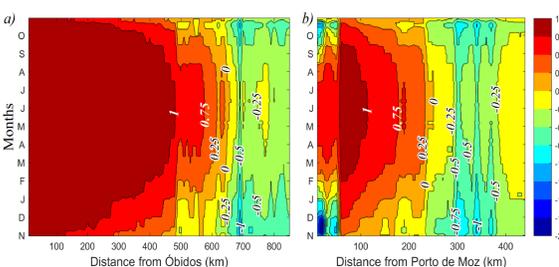


Fig. 6: Evolution saisonnière du ratio entre le courant de flot maximal et le courant de jusant maximal, le long du canal Nord (à gauche) et du canal Sud (à droite)

Plus on remonte vers l'amont de l'estuaire, plus la marée est faible (Fig. 5) et plus le courant de marée est susceptible d'être dominé par le courant résiduel de la décharge fluviale. La figure 6 montre que ce rapport de force entre le courant de marée et le courant fluvial résiduel varie fortement au cours du cycle saisonnier, avec une limite entre le régime avec renverse (valeurs négatives du ratio flot/jusant) et le régime sans renverse (valeurs positives du ratio flot/jusant) qui migre saisonnièrement de 170km entre la saison de crue et la saison d'étiage. Cette saisonnalité du régime de courant de marée est synthétisée sur la carte de la figure 7.

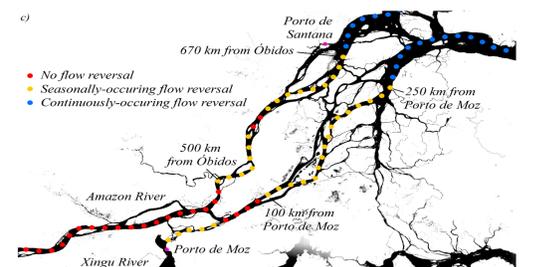


Fig. 7: Régime de renverse du courant de marée. En bleu, les zones où la renverse a lieu toute l'année. En jaune, les zones où la renverse se produit uniquement à certaines saisons, en étiage. En rouge, les zones où la renverse n'a jamais lieu.

Caractéristiques de la marée lors des années extrêmes

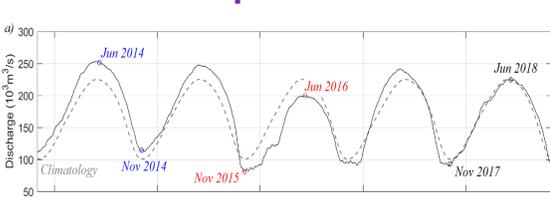


Fig. 8: Evolution interannuelle du débit de l'Amazonne. La climatologie est superposée en pointillés. Les labels indiquent les crues et étiages excédentaires (bleu) et les crues et étiages déficitaires (rouge).

Outre le cycle saisonnier, l'estuaire de l'Amazonne est le siège d'anomalies interannuelles. Huit des dix plus fortes crues enregistrées ont eu lieu au cours des 15 dernières années. Les débits d'étiage peuvent également présenter des anomalies significatives, certaines années (Fig. 8). La figure 9 illustre la réponse du système à ces anomalies interannuelles. Les anomalies d'amplitude de marée sont marquées dans la partie centrale de l'estuaire (300 – 400km en amont de l'embouchure), où elles atteignent la demi-douzaine de cm, soit de l'ordre de 15% à 30% de l'amplitude de la marée dans cette zone. Un débit fluvial excédentaire entraîne une diminution du marnage, en crue comme en étiage, et vice-versa pour un débit fluvial déficitaire.

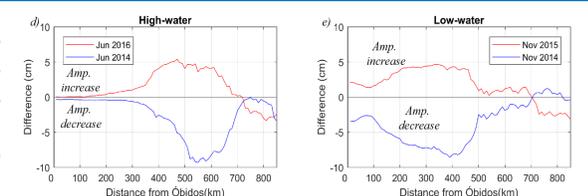


Fig. 9: Profil spatial de l'anomalie de l'amplitude de la marée modélisée le long de l'estuaire en crue excédentaire (en bleu, à gauche), en crue déficitaire (en rouge, à gauche), en étiage excédentaire (en bleu, à droite) et en étiage déficitaire (en rouge, à droite).