SEDIMENTATION DAS L'ESTUAIRE DE POTENGI, NATAL (NORD-EST DU BRÉSIL) (1)

P. NÓBREGA COUTINHO

RESUMO

No estuário do Potengi em Natal, Estado do Rio Grande do Norte, foi efetuado o estudo dos sedimentos associado às condições hidrológicas, visando problemas de instalações de um pôrto de pesca na área. Foram igualmente determinadas a natureza, a origem e as zonas de sedimentação do estuário.

As águas do estuário do rio Potengi se caracterizam por uma salinidade elevada e homogênea durante todo o ano e por fortes correntes de marés.

A análise mineralógica e granulométrica dos sedimentos mostrou a existência de três domínios de sedimentação com características próprias.

No domínio marinho estão incluídas as praias, as dunas adjacentes e a parte inferior do estuário, da desembocadura até o cais Tavares de Lira. Esta zona é caracterizada por sua elevada salinidade, fortes correntes de marés, baixo teor de carbono orgânico e uma baixa concentração de material em suspensão. Os sedimentos de fundo são representados pelas areias médias a finas, bem selecionadas, semelhantes às das praias e dunas adjacentes.

A zona situada à montante da precedente, do cais Tavares de Lira até a ponte de Igapó, é um meio onde as influências fluviais e marinhas se equilibram, portanto, uma zona de homogenização. Neste domínio se encontram as maiores variações de salinidade, as velocidades das correntes têm tendência a se atenuar, o transporte torna-se menos importante, enquanto a contribuição mineral fluvial tende a aumentar. As concentrações do material em suspensão e do carbono orgânico, são mais elevadas do que na zona anterior. Os sedimentos de fundo

(1) Publication autorisée par la SUDENE.

mostram uma grande variação de composição mineralógica, em virtude da mistura do material de origem fluvial e marinha.

O domínio fluvial parece se estabelecer a partir da ponte de Igapó. Os sedimentos desta zona variam desde silte até areia grossa e são representados por uma associação de minerais pesados típicos.

Os depósitos quaternários não consolidados das praias e dunas adjacentes, retrabalhados pelo vento, vagas e correntes de marés, constituem atualmente fontes locais de sedimentos importantes. O material fino transportado em suspensão pelo Potengi, sobretudo nas enchentes, em sua quase totalidade, se deposita a montante do cais Tavares de Lira e, apenas, uma pequena parte é levada ao largo durante a maré baixa.

A perfeita identidade das fácies estuarinas, litorâneas e das dunas, mostra que a província distributiva original se encontra ao sul. Atualmente, o estoque de sedimento disponível é mais reduzido e a edificação da cidade de Natal assim como a fixação artificial das dunas, contribuem eficazmente para a redução do assoreamento do porto.

INTRODUCTION

Le caractère des sédiments indique les conditions hydrologiques régnant près du fond et, associé à d'autres données, peut souvent être utilisé comme mesure du milieu ambiant. La sédimentation dans les estuaires n'est pas seulement un problème d'intérêt géologique; ses dépôts constants menacent avant tout la navigation et le libre accès aux ports situés dans de telles conditions.

Dans l'estuaire du Potengi, situé dans l'Etat de Rio Grande do Norte, (Nord-est du Brésil), il a été procédé à une étude des sédiments en corrélation avec les conditions hydrologiques en vue de l'installation d'un port de pêche. On a essayé de même de préciser la nature et l'origine des dépôts ainsi que leur processus de sédimentation. Les observations ont porté sur la salinité, les vitesses de courants, les sédiments en suspension et ceux du fond.

Des échantillons d'eau ont été recoltés dans les sections transversales effectuées de long de tout le canal sur une extension de 8 km, dans l'entrée du port au pont Igapó, ainsi que dans les rivières Jaguaribe et Manimbú (voir Fig. 1). Trois ou quatre échantillons d'eau ont été recoltés à chaque station aux moments critiques: pleine mer et basse mer, saison des pluies et saison sèche. Le matériel en suspension a été collecté dans les mêmes conditions. Les sédiments de l'estuaire, des plages et des dunes adjacents n'ont été prélevés qu'une fois. Tout le matériel a été étudié en laboratoire selon les méthodes classiques (Krumbein & Pettitjohn, 1938; Mateos, 1965; Ottmann, 1960).

Fig. 1 — Carte de localisation de la région étudiée avec indication des stations.
Situação da área estudada com as estações de amostras.

Ce travail a été financé par la SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste) à travers l'ancien GCDP (Grupo Coordenador do Desenvolvimento da Pesca) dirigé par Monsieur Soloncy J. C. de Moura. Il m'a été confié par Monsieur le professeur Guerreiro Júnior, dont les suggestions m'ont toujours été fort utiles. L'accès aux documents concernant le port de Natal m'a été facilité par Monsieur Ivan Reis, directeur du DNPVN (Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis). Sur le terrain, j'ai pu compter sur l'aide de Monsieur J. F. Cruz de la Estação de Biologia Marinha do Rio Grande do Norte. Que tous trouvent ici mes plus sincères remerciements.

APERÇU GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

Le port de la ville de Natal est installé à l'embouchure du fleuve Potengi. La région est formée par des sédiments pléistocènes du groupe Barreiras et par des dunes relativement récentes. Le relief est modéré, avec quelques falaises actuellement mortes et des dunes dont les plus récentes ont une direction NW. La géologie de la région a été décrite par Silva (1966).

Les côtes présentent une série de plages sableuses, interrompues par quelques pointes rocheuses qui ont résisté à l'érosion, ainsi que par quelques estuaires, parmi lesquels celui du Potengi est le plus important. A 5 km au sud du port, la côte est modifiée par la pointe Areia Preta, une barrière naturelle aux transports latéraux des sédiments. Une série de récifs plus ou moins parallèles au littoral protège efficacement la côte et la zone du port. Celui de Natal, juxtaposé à la plage, se prolonge sur 3 km vers le sud sans interruption.

Le régime du Potengi dépend étroitement des conditions climatiques locales: climat tropical avec de fortes pluies entre avril et juillet et une saison sèche allant d'octobre à décembre. Cette remarquable variation saisonnière du climat a une grande influence sur les conditions hydrologiques du littoral et de l'estuaire.

On note dans la région deux types de vents: le "nordeste" (NE) et le "sudeste" (SE). Ce dernier est le plus important dans le système de courants littoraux du sud vers le nord, en transportant du sable des plages Ponta Negra, Mãe Luiza et Areia Preta en direction du port. Pendant ce transport le matériel souffre une sélection en fractions grossière, moyenne et fine (Fig. 2). Le NE est moins important au point de vue du transport, bien qu'il soit à l'origine d'un contre-courant sans grandes conséquences sur la sédimentation dans l'estuaire. De plus, il favorise la pénétration de la marée de salinité.

Il faut mentionner encore un faible courant de diffraction, produit par le déferlement des vagues sur le "dique do Picão". Il ne favorise que la sédimentation d'une faible quantité du sable fin près du Forte, entre les "diques Picão et da Limpa".

SALINITÉ

Les eaux se caractérisent par une salinité élevée et homogène dans tout l'estuaire, soit à marée haute, soit à marée basse. Durant la saison sèche de l'année 1966, sur toute l'étendue de l'estuaire, entre l'entrée du port et la "Base Naval" les variations de salinité, tant en surface qu'au fond, n'ont pas dépassé 0,05‰ à pleine mer et 1,85‰ à basse mer.

Pendant l'hiver 1967, à pleine mer, on a noté une augmentation progressive d'aval en amont. Au pont on a enregistré 3,30‰ en surface et 10,80‰ au fond; au quai de la "Base Naval" respectivement 6,80‰ et 11,90‰; "Pedra do Rosário" 7,30‰ en surface et finalement, à l'embouchure 26,00‰ en surface et 30,38‰ au fond. Les valeurs de basse mer dans cette même période se sont montrées très voisines de celles de pleine mer. Aucun courant de flux en surface n'a été enregistré au pont. Par contre, au fond, la présence de ce même courant se traduisait par une salinité de 10,80‰ au même endroit.

L'eau salée remonte donc par le fond, comme c'est de rigueur, et notamment par le chenal navigable.

D'après la classification de Pritchard (1955) cet estuaire est du type "well-mixed" pendant l'été (différence de salinité entre surface et fond inférieure à 3‰). D'autre part, en hiver il prend un caractère "partly-mixed", avec cette même différence supérieure à 4‰.

SEDIMENTS

Les sédiments ont été classés d'après leur composition granulométrique en quatre types: sable grossier, moyen, fin et argile silteuse (voir Fig. 2).

Les sables grossiers se trouvent seulement sur le littoral sud, aux plages Areia Preta et Mãe Luiza. Dans l'estuaire, ils sont très mal représentés. Ils contiennent des grains de quartz sous-anguleux, mats, bien classés avec $Qd\phi$ entre 0,25 — 0,43 et un coefficient d'asymétrie ($SKq\phi$) zéro. L'absence de micro-organismes est remarquable (Courbe 24 de la Fig. 3).

Les sables moyens prédominent surtout le long du canal, depuis l'embouchure jusqu'au quai Tavares de Lira, par la rive droite. La fraction sableuse varie de 84 à 99%, la nature pétrographique des grains reste la même: un peu moins sélectionnés, $Qd\phi$ de 0,20 à 1,30, légèrement asymétriques, avec très

Fig. 2 — Répartition superficielles des faciès.
Repartição superficial das fácies.

peu de mica (fig. 3, courbes 1 et 4). La micro-faune est assez pauvre, représentée par des fragments de lamellibranches, de gastropodes et de rares foraminifères de la famille Miliolidae.

Au milieu du canal principal, de l'ancien appontement d'hydravion jusqu'au quai de la "Base Naval", on trouve du sable fin (Fig. 3, courbes 19 et 29). Ce même faciès est présent aux dunes (dune du Farol, par exemple), sur la partie supérieure de la plage du Forte, où il forme de petites dunes, ainsi, qu'entre le "digue da Limpa" et le récif du "Forte".

Le faciès argile silteuse avec un peu de sable fin, se trouve de l'autre côté du quai de la "Base Naval" et dans une petite rade près de la Pedra do Rosário. La combinaison argile-silte est toujours supérieure à 55%. La fraction sable est constituée de mica et de petits grains de quartz anguleux. Ce sont des sédiments peu sélectionnés, avec un grand pourcentage de matériel fin en suspension apporté par le fleuve, et déposé dans la zone de transition entre l'eau salée et l'eau saumâtre. Les courbes de ce faciès (Fig. 3, courbes 16 et 23) sont typiques de matériel transporté par les fleuves, essentiellement en suspension, ainsi que (environ 40%) par charriage sur le fond.

Tous les types de faciès trouvés se caractérisent par la prédominance de grains de quartz clastiques et par un faible contenu de carbonate de chaux (0,5% dans les dunes, 3% dans les sables littoraux et moins de 5% à l'entrée du port).

Matériel en suspension apporté par le Potengi

En été, les eaux relativement claires ne charrient que peu de matériel, de 16 à 259 mg/l à basse mer et de 49 à 118 mg/l à pleine mer. En crue, les valeurs maxima ont été de l'ordre de 719 mg/l. En comparant les teneurs en suspension du Potengi avec ceux du Capibaribe obtenus par Ottmann (1960), on voit que dans la période d'étiage les deux valeurs sont très proches; au contraire, en crue les valeurs du Capibaribe sont très importantes, arrivant à un maximum de 14,6 g/l.

Du point de vue granulométrique, le matériel est formé de silte et d'argile, avec moins de 2% de sable fin, de fibres végétales, de diatomées et de rares foraminifères. Dans la fraction minérale, on trouve du microquartz anguleux, du mica, des agrégats ferrugineux et des minéraux argileux. Il n'y a pas de calcaire dans ce sédiment.

Ce matériel vient des sédiments argilo-sableux du groupe Barreiras et, en faible quantité, de l'érosion des berges à l'occasion des crues. La plus grande partie des argiles en suspension, floccule dans la zone en amont du quai Tavares Lira, où la salinité augmente très vite. De plus, la réduction de vitesse des

Fig. 3 — Courbes cumulatives des principaux types de faciès.
Curvas cumulativas dos principais tipos de faciès.

courants, surtout à marée montante, favorise la sédimentation des agrégats floculés.

Distribution du carbone organique

Les valeurs du carbone organique varient entre 0,35 et 1,10% avec une moyenne de 0,91% dans la fraction fine. On voit que les teneurs les plus élevées sont directement liées au rôle des fleuves et que les zones les plus riches correspondent aux faciès d'argile siltique et de sable fin. Par contre, les plus basses, se trouvent dans la zone de l'embouchure où l'influence des apports fluviaux est presque nulle et où le faciès de sable moyen contient jusqu'à 99% de quartz.

Dans la plupart des sédiments récents les concentrations de carbone organique augmentent avec la diminution de la granulométrie du matériel (Gross, 1966). Dans l'estuaire, les plus hautes valeurs se trouvent en zones d'eaux calmes, correspondant aux faciès d'argile siltique, de couleur noirâtre, tandis que les plus basses sont restreintes aux sables quartzeux, bien classés et lavés de l'entrée du canal.

SOURCES DES SEDIMENTS

Les dépôts quaternaires non consolidés des plages et des dunes adjacentes retravaillées par le vent, les vagues et les courants de marée, constituent actuellement des sources locales importantes de sédiments. Cela est confirmé par la grande ressemblance de la texture et de la minéralogie des sédiments des plages, des dunes et de la partie inférieure de l'estuaire (comparer les courbes de la Fig. 3). Une autre source moins importante est suivie par l'érosion dans le bassin de drainage. Le matériel fin en suspension dans le Potengi, surtout à l'occasion des crues, est amené à l'estuaire où il est déposé pendant la marée basse ou transporté au large.

Les fractions silte et arglie, qui donnent au sédiment un caractère vaseux, n'apparaissent qu'en amont du quai Tavares de Lira. L'abondance de sable dans le canal est associée à la présence des dunes sur la côte extérieure et aux fonds sous-marins sableux proches.

Pendant le mois d'août 1966 a été observé un important transport éolien de sable fin provenant des petites dunes de la plage du Forte eu direction au canal de l'estuaire. Vu la présence du "dique da Limpa" la plupart de ce matériel a donné naissance à des dépôts de 2 m d'épaisseur, en dehors du canal.

L'analyse minéralogique et granulométrique des sédiments a révélé un grand composant fluvial et une autre marin. Au fond du canal de l'estuaire, on voit un troisième composant, celui de la transition fluvio-marine (Fig. 2).

Dans le domaine marin sont incluses les plages, les dunes adjacentes et la partie inférieure jusqu'au quai Tavares de Lira. Les sédiments de l'estuaire de cette région sont semblables à ceux des plages Areia Preta, Mãe Luiza et des dunes côtières.

La zone d'influence marine du Potengi se caractérise par une forte salinité (soit en saison des pluies, soit en saison sèche), de forts courants de marée, une basse teneur en carbone organique et une basse concentration de matériel en suspension. En été, la salinité a toujours été supérieure à 32‰ et en hiver on a remarqué une légère diminution, la salinité restant cependant supérieure à 26‰. L'existence de forts courants dans cette région empêche la sédimentation actuelle. Il existe pourtant un important transport de sédiment sur le fond, même de sable grossier. Il est évident que ce matériel transporté sera déposé en d'autres endroits où les accidents bathymétriques, topographiques, etc., favorisent la sédimentation. L'exemple typique a été la construction du "digue da Limpa" en 1923, qui a donné naissance à de forts courants de fond, jusqu'à 96 cm/s, capables de transporter même des matériaux grossiers. La conséquence a été la disparition du "banco das Velhas", localisé près de ce "digue" et l'augmentation de la "coroa dos Macacos" et d'autres bancs au large. Postma, (1965) a montré que la concentration de matériel en suspension augmente exponentiellement avec la vitesse du courant. Selon ce même auteur, d'importantes quantités de sable fin ne sont mises en suspension que lorsque cette vitesse est supérieure à 50-60 cm/s et la vitesse de 55 cm/s est suffisante pour transporter des grains de 150 microns. Dans de telles conditions, environ 50% des particules transportées sont mises en suspension et 50% charriées sur le fond. La vitesse minimum nécessaire au transport de sable de cette même taille est de 500 cm/s pour le vent et de 35 cm/s pour un courant d'eau, selon les données de Sundborg (1956, in Postman, 1965). Dans le chenal de la partie inférieure de l'estuaire étudié à 50 cm du fond, la vitesse des courants varie entre 30 et 58 cm/s à pleine mer et 64 et 96 cm/s à basse mer. Les possibilités de transport par le vent sont légèrement inférieures à celles de courants.

D'autre part, le matériel en suspension peut atteindre la barre et être jeté au large, et ensuite dirigé vers le nord, en suivant le système de courants littoraux. La concentration du matériel en suspension a toujours été inférieure à 35 mg/l. et

les teneurs les plus élevées se trouvent sur la rive gauche. A cause de la forte salinité, presque la totalité de ce débit se dépose en amont du quai Tavares de Lira, en formant les slikkes et shores par le mouvement de pulsations transversales dû aux mouvements de marée (Francis-Boeuf, 1947). La langue d'eau salée profonde est totalement dominée par la variation de la marée et fonctionne comme une vraie barrière, empêchant l'arrivée de sédiments fins transportés de la partie supérieure vers la zone en aval du quai Tavares de Lira.

La zone située en amont de la précédente, du quai Tavares de Lira au pont Igapó, est le milieu où les influences fluviales et marines s'équilibrent; c'est donc une zone d'homogénéisation (Giresse, 1965). La limite de ce domaine avec le domaine marin est variable; on l'a fixée au quai Tavares de Lira, en tenant compte de la distribution des faciès, des minéraux micacés et du carbone organique. Cette limite varie aussi selon les conditions climatiques. Dans ce milieu se trouvent les plus grandes variations de salinité, les vitesses des courants ont tendance à s'atténuer, et le transport devient moins important tandis que la contribution minérale fluviale tend à augmenter. Les concentrations du matériel en suspension dans ce domaine sont plus élevées, de 306 mg/l à 719 mg/l.

Les sédiments de fond montrent une grande variation dans la composition minéralogique, vu le mélange de matériel d'origine fluviale et marine. En suivant les minéraux lourds et les micacés, par exemple, on a pu bien délimiter l'influence fluviale qui est marquée par la diminution gradative de ces mêmes minéraux, pour finalement disparaître au quai Tavares de Lira. L'étude de la répartition du carbone organique confirme aussi la limite qui vient d'être marquée.

CONCLUSION

L'exposé qui vient d'être fait sur les caractéristiques de la sédimentation démontre bien que le Potengi présente des caractères assez exceptionnels pour un estuaire: grande abondance de sable quartzueux bien classé et une faible extension de vase proprement dite. Cette prédominance de sable est associée à la présence des dunes sur la côte extérieure et des fonds sous-marins sableux proches, qui sont également alimentés par les dunes. Les fractions silte et argile n'apparaissent que dans les zones abritées près de la rade Pedra do Rosário et dans les angles morts sur les rivages.

Vu la forte salinité des eaux pendant tout l'année, la zone de floculation des argiles se trouve en amont du quai Tavares de Lira où la réduction de vitesse des courants, surtout à marée montante, favorise la sédimentation des agrégats floculés.

Comparés au faible débit du fleuve, les courants de marée jouent un rôle très important dans la sédimentation. Ces courants sont assez forts et capables de transporter même des matériaux grossiers. L'augmentation de la profondeur de la partie inférieure du canal et la disparition du "banco das Velhas" est dû à ces courants. Le courant de diffraction sur le "dique do Picão" est très peu important. L'endiguement aurait dû accélérer systématiquement la circulation des eaux dans l'espace fluvio-marin construit.

Le colmatage progressif auquel on assiste à l'heure actuelle est surtout de nature marine. Tous les faciès de l'estuaire montrent la faible contribution fluviale, sauf la langue de sable fin du milieu du canal, où le pourcentage de matériel apporté par le Potengi est important, surtout en amont du quai Tavares de Lira. La distribution du calcaire dans les sédiments a montré que tout le matériel sableux est très pauvre en carbonate de chaux, ce qui traduit un fort lessivage, semblable à ce qui s'est passé avec le sable des dunes. Le "dique da Limpa" et les récifs empêchent une grande partie du sédiment transporté, soit par le vent, soit par les courants littoraux, d'atteindre le chenal du port.

La parfaite identité des faciès de l'estuaire, du littoral et des dunes, montre que l'origine des sédiments se trouve au sud, sur les plages Ponta Negra, Mãe Luiza, Areia Preta et les dunes adjacentes. A l'heure actuelle, le stock de sédiment disponible est plus réduit et la construction de la ville de Natal, ainsi que la fixation artificielle des dunes, contribuent efficacement à la réduction du colmatage du port.

REFERENCES

- FRANCIS-BOEUF, CL., 1947. Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire. *An Inst. océanogr. Monaco*, 23(3): 149-344.
- GIRESSE, P., 1965. Modalité de la sédimentation dans l'estuaire de la Sienne. Principales zones de dépôt. *Cahiers océanogr.*, 17: 45-52.
- GROSS, M. G., 1966. Organic carbon in surface sediment from the northeast Pacific Ocean. *Oceanol. & Limnol.* 1: 46-54.
- KRUMBEIN, W. C. & PETITJOHN, F. J., 1938. *Manual of sedimentary petrography*. Appleton-Century-Croft, New York, 549 p.
- MATEOS, J. M., 1965. *Análisis mineralógico de arenas*. Patronato "Alonso de Herrera", Madrid, 265 p.
- OTTMANN, F., 1960. A propos des crues du Capibaribe. *Trabs. Inst. Biol. marit., Oceanogr., Univ. Recife*, 2: 261-266.

OTTMANN, J. M., 1960. Dosages du carbone et de l'azote organiques dans les sédiments marins. *Trabs. Inst. Biol. marit., Oceanogr., Univ. Recife*, 2: 249-258.

POSTMAN, H., 1965. Water circulation and suspended matter in Baja California lagoons. *Netherlands Journ. Sea Res.*, 2: 566-604.

PRITCHARD, D. W., 1955. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system. *Journ. marit. Res.* 11(2): 106-123.

SILVA, A.C. 1966. Considerações sobre o quaternário do Rio Grande do Norte. *Arq. Inst. Antropologia Univ. Fed. Rio Grande do Norte*, 2(1/2): 275-301.