

Frédéric BALTZER (1). — **La sédimentation et la diagenèse précoce sur les côtes à mangrove en aval des massifs ultrabasiques en Nouvelle Calédonie.** Thèse de doctorat d'État, Orsay, 1<sup>er</sup> juillet 1980.

**RÉSUMÉ.** — Sur la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie, les sédiments forment de petits deltas au fond des rias creusées pendant les régressions marines du Quaternaire. Les deltas ont pris naissance vers la fin de la transgression Holocène, voici moins de 5 000 ans. Les plus importants se sont construits à partir des produits d'érosion des altérites des massifs ultrabasiques. En effet, sous l'action du climat tropical à saisons alternées qui règne sur l'île, ces massifs relativement élevés et très étendus sont profondément altérés (TRESCASES, 1975) à la fois à cause de la susceptibilité des péridotites devant l'altération et à cause du lessivage résultant d'une pluviométrie à régime orographique atteignant plusieurs mètres par an sur les sommets.

Les plaines côtières et les marais maritimes (mangroves et prés salés, photo 1), en revanche, sont soumis à un climat beaucoup plus sec, avec des précipitations annuelles de l'ordre de 1 000 mm pour une température moyenne de plus de 23°. Dans ce domaine, les conditions de salinité du sol sont dulci-coles dans l'environnement de la plaine côtière et saumâtres à marines dans les mangroves, mais entre les deux, à la partie supérieure des marais maritimes, elles deviennent hypersalines.

Au cours de l'histoire quaternaire récente, les sédiments de ces deltas ont été soumis à des facteurs géodynamiques variés qui ont influencé d'abord leur mise en place (niveaux marins, tectonique, végétation, crues) puis les transformations géochimiques qu'ils ont subies après leur dépôt (altération, silicification, enrichissement en matière organique).

L'objet de ce travail (BALTZER, 1982) a été l'examen de toutes ces conditions de mise en place puis de transformation des sédiments.

C'est sous l'influence de la montée du niveau marin au cours de l'Holocène, que le prisme sédimentaire, commençant par des dépôts fluviatiles, passe ensuite

à une sédimentation de ria. Par contre, le fait que les dépôts prennent vers moins 5 000 ans une forme deltaïque est lié plutôt à un recul temporaire du niveau marin relatif. De nos jours, la transgression



PHOTO 1. — Mangrove centrale du delta de la Dumbéa. Zone mixte à *Bruguiera* et *Rhizophora*. Les plus grands arbres sont au voisinage d'un petit chenal de marée.

*Central mangrove of the Dumbéa delta. Mixed zone with Bruguiera and Rhizophora. The highest trees are close to a small tidal channel.*

Центральные мангровые заросли дельты р. Думбэа. Зона смешанного типа с *Bruguiera* и *Rhizophora*. Самые высокие деревья находятся недалеко от небольшого приливного и отливного русла.

(1) E.R.A. n° 765, Laboratoire de Pétrologie sédimentaire et Paléontologie. Université de Paris-Sud, 91405 Orsay Cedex.

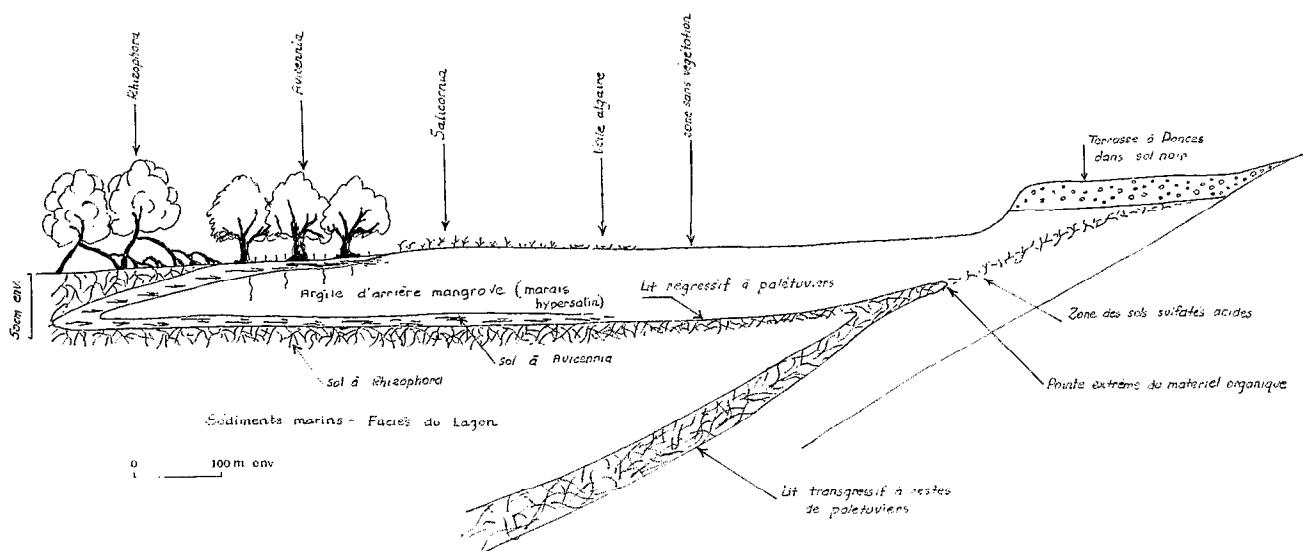


FIG. 1. — Variation de la ligne de rivage à l'Holocène, indiquée par la stratigraphie des tourbes de mangrove dans les sédiments côtiers.

*Variation of the shore-line in the Holocene, as revealed by the stratigraphy of the mangrove peats in coastal sediments.*

Изменение береговой линии в голоценовый период, указанное стратиграфией мангровых торфов в прибрежных осадках.

holocène, très ralenti, semble se continuer (fig. 1).

La sédimentation actuelle est alimentée surtout par l'érosion de la phase résiduelle des massifs de péridotites très riches en minéraux secondaires (surtout hydroxydes de fer) et contenant accessoirement des minéraux primaires non altérables (serpentine, spinelle chromifère) et occasionnellement épargnés par l'altération (enstatite, péridot). Secondairement, l'érosion des profils de bas de pente apporte des minéraux (serpentine, talc, quartz secondaire, silice amorphe). Les eaux des cours d'eau, enrichies en silice et en magnésium par le lessivage, nourrissent à l'aval des précipitations minérales (quartz, smectites, carbonates) ou biologiques (Diatomées, Mollusques) qui s'ajoutent à la fraction détritique en proportions variables.

#### *Un delta et ses sédiments : le delta de la Dumbéa (fig. 2)*

Le delta actuel se compose d'un chenal principal, bordé de levées sédimentaires naturelles formant une avancée de terre ferme dans l'axe de la ria. De part et d'autre, s'étendent deux dépressions latérales occupées par des marais maritimes et leur système de drainage centré sur un chenal principal (rive gauche) ou sur une baie (rive droite).

Les sédiments des levées sont des sables limoneux dans lesquels on trouve principalement des pseudo-particules ferrugineuses, parfois parcourues de vei-

nules de quartz ou de serpentine, avec de l'enstatite, du quartz et de l'antigorite. Les sédiments des dépressions latérales sont des limons et des argiles dont la composition minéralogique associe à des hydroxydes de fer riches en silice adsorbée, de l'antigorite, un peu de talc, de kaolinite (dégradation de roches alumineuses du cortège des péridotites) et des traces de smectite. La fraction sédimentaire d'origine biologique est abondante dans les dépressions latérales, puisque la matière organique végétale atteint jusqu'à 50 % du poids sec dans les sols des mangroves, la silice des frustules de Diatomées jusqu'à 10 % et, le carbonate de calcium, quelques %

Le mode de mise en place des sédiments a été élucidé par trois voies complémentaires : évolution dynamique et écologie des marais maritimes, évaluation directe des crues cycloniques et enfin, interprétation de l'évolution granulométrique des sédiments.

L'évolution dynamique des marais mise en évidence par la zonation végétale permet de construire une datation relative de leurs divers éléments. Dans le cas de la Dumbéa, elle montre que le développement des marais est plus ancien et pratiquement achevé sur la dépression latérale de rive gauche alors qu'il a commencé récemment et est toujours en cours sur la dépression latérale de rive droite (fig. 2). De plus, ces études démontrent l'existence d'une double alimentation des mangroves en substances nutritives et en sédiments par les crues fluviatiles, depuis

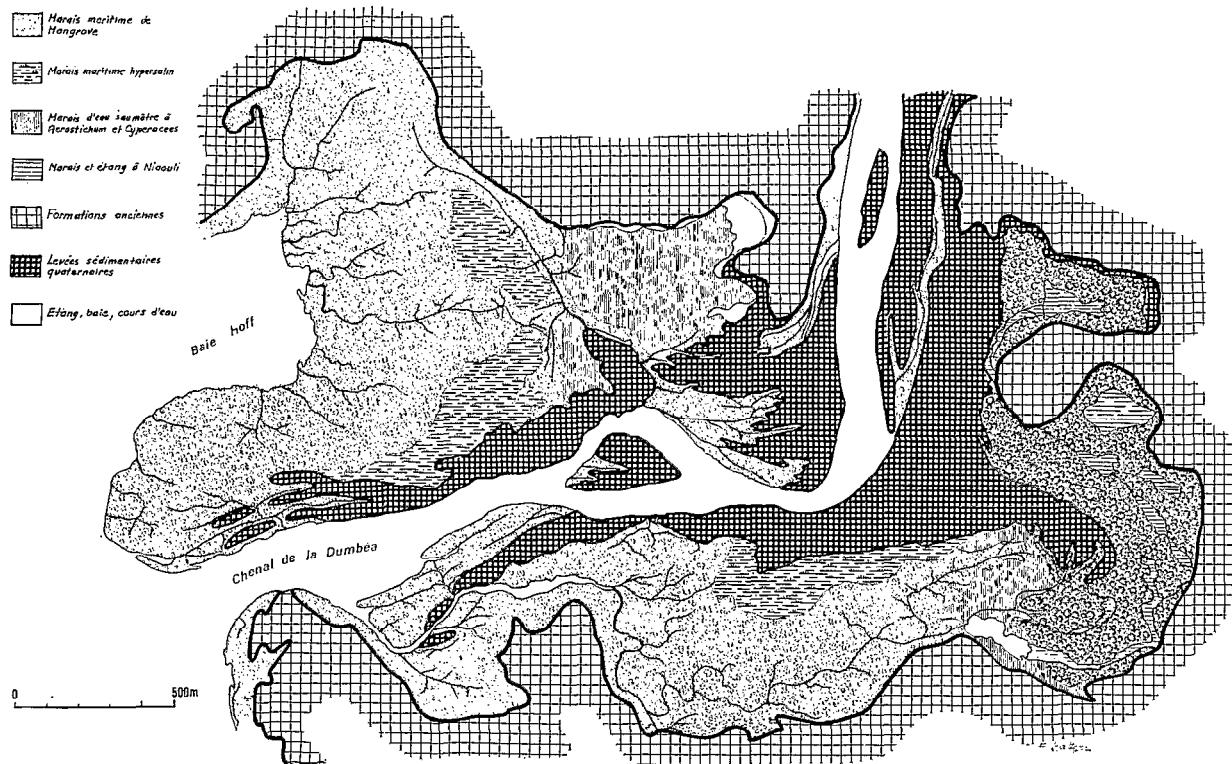


FIG. 2. — Végétation des grandes unités morphologiques du delta et disposition des chenaux de marée du delta de la Dumbéa.

*Vegetation of the great morphological units of the delta and arrangement of the tidal channels in the Dumbéa delta.*

Растительность крупных морфологических элементов дельты и расположение приливных и отливных русел в дельте р. Думбэа.

l'estuaire et par les marées depuis les baies et les chenaux. Les sédiments apportés par les crues construisent les levées en recouvrant les sols les plus anciens de la mangrove alors que les sédiments d'origine marine recouvrent leur frange externe récente.

L'examen et l'interprétation de la zonation végétale se révèlent comme un moyen d'évaluer le niveau topographique du sol dans les marais et comme un moyen de prédire la répartition des conditions géochimiques (potentiel redox, pH, salinité) dans les sols gorgés d'eau. L'évolution suggérée par les conditions géochimiques se recoupe remarquablement avec l'évolution historique déterminée par approche écologique et hydrodynamique.

La mesure directe des effets des crues cycloniques (direction des courants, morphologie de l'onde de crue, énergie dissipée, épaisseur et granulométrie des dépôts sédimentaires) montre leur rôle prépondérant dans la formation d'un delta comme celui de la Dumbéa. L'épaisseur, la granulométrie et la répartition des dépôts de chaque crue reproduisent et amplifient la morphologie deltaïque acquise au cours

des crues précédentes. La végétation (mangroves, prés salés, levées, marais forestiers dulcicoles) brise très efficacement les courants les plus violents et permet la rétention de particules fines. Le fleuve dépose des sables fins limoneux sur les levées colonisées par des graminées et dépose des argiles dans les dépressions latérales occupées par les mangroves. Le calcul montre que ces dépôts s'accompagnent d'une consommation d'énergie gravifique qui, en l'absence de végétation, serait suffisante pour transporter des galets.

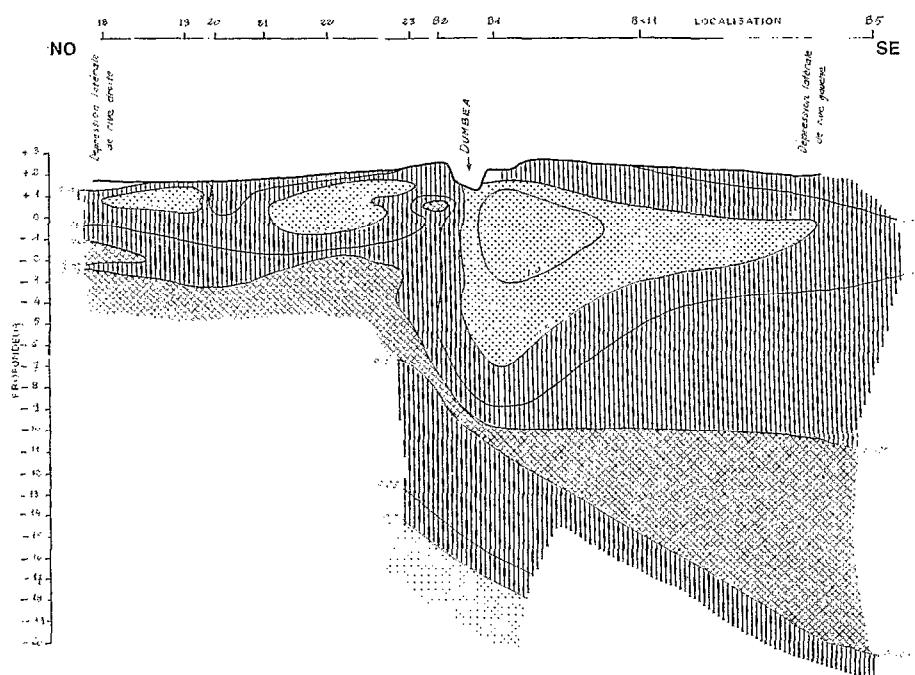
Le fait d'avoir pu échantillonner des sédiments juste après leur dépôt par une crue exceptionnelle à l'échelle humaine (record de pluviométrie sur au moins 15 ans pour la plupart des localités), joint à une bonne pratique des méthodes d'interprétation développées à Orsay par A. RIVIÈRE et notre groupe, m'ont incité à approfondir les rapports entre la granulométrie et les conditions de dépôt des sédiments.

J'ai appelé séquence évolutive granulométrique la succession des sédiments abandonnés par la même crue suivant une même ligne de courant ou un même

transect. La granulométrie des séquences évolutives met en évidence les interactions entre les particules des diverses dimensions (piégeage des limons par les sables ou des argiles par les limons) et l'existence de nanoparticules piégées dans les interstices des limons et argiles.

Un autre résultat de l'étude des séquences évolutives granulométriques a été de montrer comment les granofaciès se forment dans les suspensions naturelles au cours du transport et pourquoi ils sont de bons indicateurs des conditions d'énergie du milieu. Sur le plan géodynamique, ce lien avec les conditions

d'énergie met en évidence en premier lieu l'existence des deux grandes directions d'apports sédimentaires dans les mangroves (débordement des crues et marées dans les baies et chenaux), déjà suggérées par l'observation directe des crues et par l'interprétation de la zonation végétale. En plus, le lien des faciès granulométriques avec les conditions d'énergie permet de reconstituer l'évolution de ces conditions au cours du temps sur l'ensemble du delta et de les rattacher aux variations de profondeur dans la ria, déduites de nos études sur les paléo-niveaux marins de l'Holocène (fig. 3).



ici à des néoformations minérales de quartz, sulfates, hydroxydes et carbonates, ceci sous la dépendance stricte des conditions d'oxydo-réduction.

#### *Mouvement des eaux interstitielles dans les marais (fig. 4)*

Les sols de mangrove les plus riches en matière organique prennent la forme de tourbes qui épongent l'eau du flot et la relâchent lentement au jusant. Une part de cette eau percolé vers la frange externe de la mangrove et s'écoule finalement par le réseau des

chenaux de marée. L'autre part percolé vers la frange terrestre des mangroves pour compenser l'évaporation induite par l'aridité du climat. C'est ce qui explique le transport de matière minérale de la zone centrale vers la marge interne des marais de mangrove. Les eaux fluvio-marines étant généralement stratifiées sur cette côte, c'est initialement une eau de chlorinité inférieure à la chlorinité de l'eau de mer qui recharge la nappe. Mais cette eau se concentre en direction de la frange terrestre des mangroves et, au-delà, le milieu devient sursalé et présente une végétation de pré salé puis un domaine à voile algare, voire une zone sans végétation.

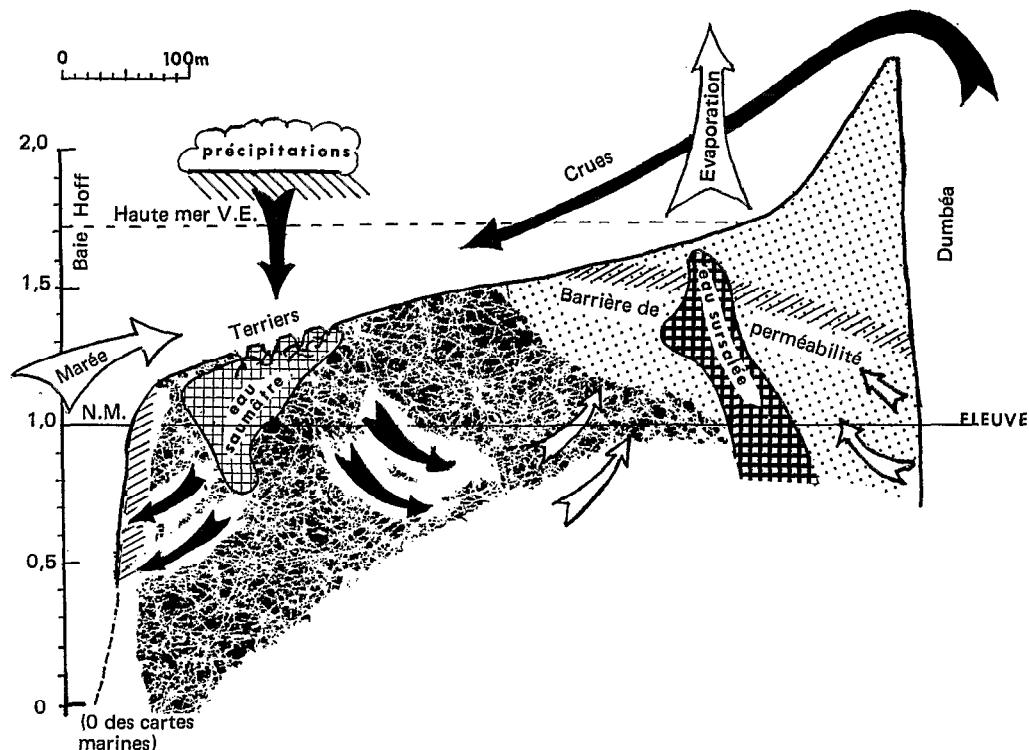


FIG. 4. — Alimentation de la nappe et circulation des eaux interstitielles dans le delta de la Dumbéa.

*Supply of the water table and circulation of interstitial waters in the Dumbéa delta.*

Питание водоема и движение поровых вод в дельте р. Думбэа.

#### *Conditions d'oxydo-réduction et de pH*

Les conditions d'oxydo-réduction sont réductrices dans tous les sols de mangrove, sauf dans la couche superficielle du sol où les Eh sont voisins de 0 ou légèrement positifs. Cette couche à Eh voisin de 0 s'épaissit fortement dans la partie centrale de la mangrove, sous l'influence de l'infiltration d'eaux fraîches venant recharger la nappe.

En revanche, les conditions sont systématiquement oxydantes dans le domaine sursalé et dans le sol des

levées. Les zones de contact se signalent par des Eh voisins de 0.

Les pH sont neutres ou légèrement acides dans les mangroves alors qu'ils sont à tendance basique dans le domaine hypersalin.

#### *Localisation des phénomènes de réduction des sulfates et dégradations minérales*

La réduction des sulfates est particulièrement active dans la partie centrale de la mangrove par où

PLANCHE I

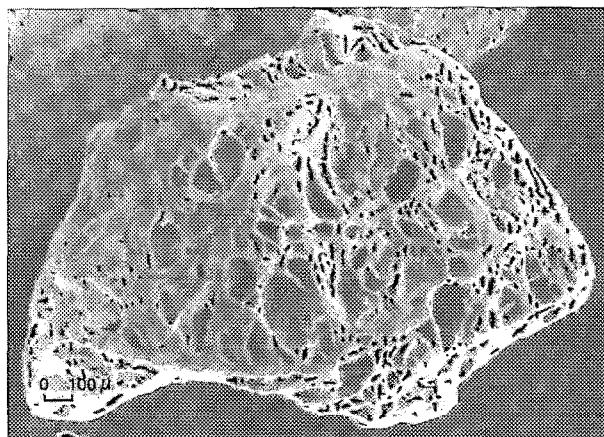


PHOTO 2. — Maillage d'antigorite séparé de son cristal de péridot qui a été altéré en goethite dans un profil ferrallitique puis dissous par les conditions réductrices acides du sol de mangrove. G = 50.

*Antigorite mesh separated from its crystal of peridot which has been weathered to goethite in a ferrallitic profile and dissolved by the acid reducing conditions of the mangrove soil. G = 50.*

Решетка антигорита без ее кристалла перидота, претерпевшего изменение на гетит в ферралитическом профиле и потом растворение кислыми восстановительными условиями мангровой почвы  $\times 50$

PHOTO 3. — Pyritosphère à cristaux de pyrite engrenés (sol de Mangrove à *Bruguiera*). G = 10.000.

*Pyritosphere with meshed crystals of pyrite (Mangrove soil with *Bruguiera*). G = 10,000.*

Сферический пирит с зацепленными кристаллами пирита (мангровая почва с *Bruguiera*)  $\times 10\,000$ .

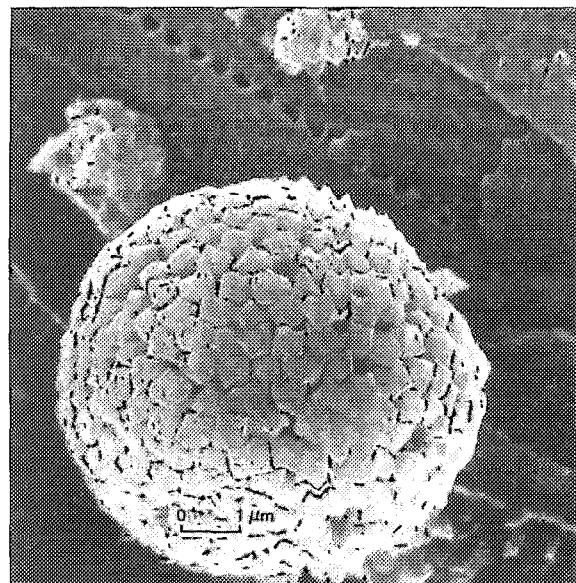
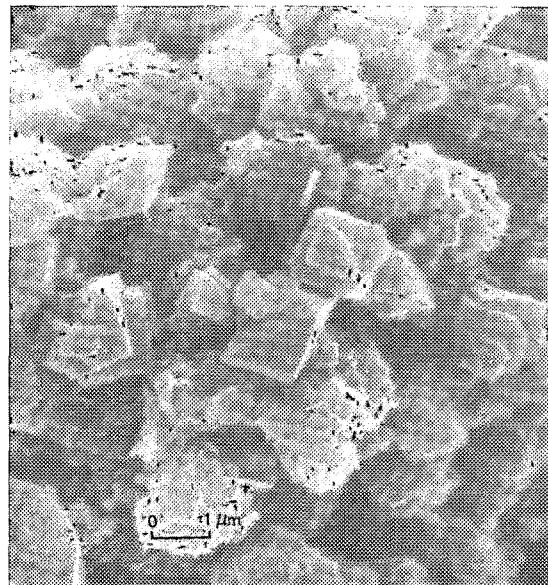


PHOTO 4. — Amas complexe de cristaux de pyrite. Sol de Mangrove centrale mixte à *Bruguiera* et *Rhizophora*. G = 10.000.

*Complex accumulation of crystals of pyrite. Soil of the central mangrove with *Bruguiera* and *Rhizophora*. G = 10,000.*

Сложный агрегат кристаллов пирита. Почва смешанных центральных мангровых зарослей с *Bruguiera* и *Rhizophora*  $\times 10\,000$ .



PHOTO 5. — Débris de Diatomées en cours de dissolution dans le sol de la mangrove à *Bruguiera*. G = 5.000.

*Debris of dissolving diatoms in the mangrove soil with Bruguiera. G = 5,000.*

Обломки диатомовых водорослей в процессе растворения в почве мангровых зарослей с *Bruguiera* × 5 000.

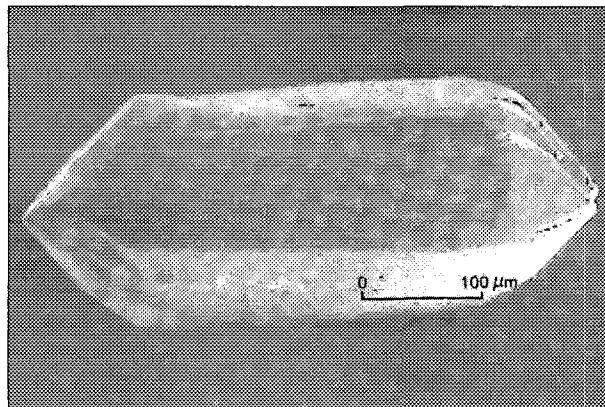


PHOTO 6. — Quartz de néogenèse bipyramidalé, limpide au microscope optique. G = 200.

*Bipyramidal neogenetic quartz, transparent under the optical microscope. G = 200.*

Новообразованный бипирамидальный кварц, просвевающий под оптическим микроскопом × 200.

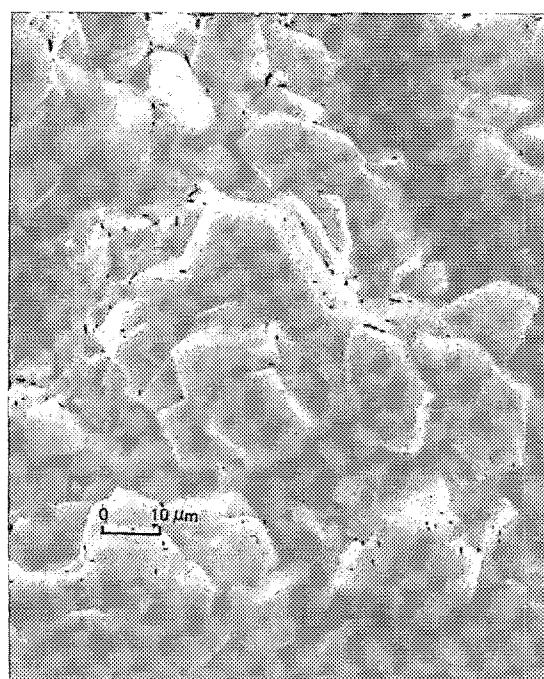


PHOTO 7. — Détail d'un grain de quartz automorphe polycristallin venant du soubassement d'une levée du delta de la Dumbéa. G = 1.000.

*Debris of a grain of polycrystalline and automorphic quartz from the basement of a levee in the Dumbéa delta. G = 1,000.*

Обломки зерна поликристаллического автоморфного кварца, происходящего от фундамента дамбы дельты р. Думбэе × 1 000.

s'infiltrent les eaux saumâtres. Le fer sédimenté sous forme d'hydroxyde hérité des sols ferrallitiques est solubilisé en fer ferreux et les minéraux emprisonnés dans cette gangue sont libérés (photo 2). Après avoir été mis en solution par la nappe, le fer se redépose sous forme de framboïdes (photo 3) et d'octaèdres (photo 4) de pyrite, ce qui se traduit par une concentration du fer total centrée sur la zone des infiltrations les plus actives. Dans le même environnement, les argiles ultrafines, l'antigorite et les frustules des Diatomées (photo 5) sont attaqués et libèrent leur silice dans l'eau de la nappe avec une concentration pouvant atteindre 200 ppm. Dans le cas des Diatomées, la solubilisation semble être favorisée par les acides humiques du sol de mangrove. Ces derniers semblent agir comme des chélates bloquant le fer et introduisant ainsi la formation d'une pellicule de silicate entourant les frustules et les protégeant contre la dissolution.

#### *Néoformations*

En percolant des sols de la mangrove centrale vers ceux de la frange terrestre des mangroves puis des marais sursalés, l'eau interstitielle voit sa chlorinité tripler alors que sa teneur en silice diminue régulièrement de 200 ppm à 13 ppm dans la zone des Eh voisins de 0 marquant le passage du domaine réducteur au domaine oxydant. Les études au microscope électronique à balayage et au microscope optique (pour les inclusions fluides) mettent en évidence la

formation de quartz (photos 6 et 7) le long de ce trajet et la diffractométrie X et l'A.T.D. montrent la formation d'une smectite ferrifère dans la zone des Eh voisins de 0 où la teneur en silice de l'eau interstitielle s'abaisse à 13 ppm.

Ces néoformations silicatées apparaissent donc comme contrôlées par les conditions d'oxydo-réduction. Le fer est présent partout, mais il ne peut réagir avec la silice pour former la smectite (nontronite) que si le Eh permet sa mise en solution en quantité appréciable. Il est retenu soit dans la structure de la pyrite si le Eh est trop bas, soit sous forme d'hydroxyde s'il est trop élevé. Dans les deux cas, le dépôt de la silice prend seulement la forme du quartz.

#### *Conclusion*

Dans cette évolution, le rôle du climat est essentiel : c'est le climat tropical à saisons alternées qui favorise l'hydrolyse des roches cristallines, les crues fortement érosives sur les hauteurs en même temps que la concentration des nappes par évaporation et la vie des mangroves dans les zones basses. Il faut aussi un contexte géochimique convenable — ultrabasique — et un niveau marin adéquat. La réunion de tous ces facteurs peut sembler difficile, mais celle-ci réalisée, les transformations subies par les sédiments sont si rapides qu'elles acquièrent une importance géologique certaine, comme on a pu le constater dans le cas des bassins versants ultrabasiques de la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie.

#### BIBLIOGRAPHIE

Ce texte résume une thèse récemment publiée par F. BALTZER. On y trouvera une bibliographie détaillée.

BALTZER (F.), 1982. — Géodynamique de la sédimentation et diagenèse précoce en domaine ultrabasique (Nouvelle Calédonie). *Trav. et doc.*, O.R.S.T.O.M., n° 152, 286 pages, 87 figures, 20 planches.

TRESCASES (J. J.), 1975. — L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formation des gisements nickélières de Nouvelle Calédonie. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, n° 78, 280 pages, 56 figures, 9 planches photo.

Frédéric BALTZER. — **Sedimentation and early diagenesis on the mangrove coasts downstream from the ultrabasic massifs in New Caledonia.** State Doctorat Thesis, Orsay, 1980.

*Traduit du français par P.O.R.S.T.O.M.*

**SUMMARY.** — On the western coast of New Caledonia, sedimentation forms small deltas on the bottom of rias produced during Quaternary marine regressions. Deltas were formed by the end of the Holocene transgression less than 5 000 years ago, the most significant of which have originated from the erosion products of alterites in the ultrabasic massifs. These rather high and large massifs, which are subject to a tropical climate with alternating seasons, are deeply weathered (TRESCASES, 1975) owing both to the liability of peridotites to weathering and to the leaching resulting from an orographic pluviometry of several metres per year on the summits.

On the contrary, the coastal plains and the marine swamps (photograph 1) are subject to a much drier climate characterized by annual rainfalls of about 1 000 mm and a mean temperature of about 23°. Soil salinities range from fresh water in the coastal plain and brackish to marine in mangroves; they become hypersaline in the upper part of marine swamps.

During the Holocene, the sediments in these deltas were subject to various geodynamic factors which affected first their emplacement (sea levels, tectonics, vegetation, floods) and their post-depositional geochemical transformations (weathering, silicification, enrichment in organic matter). This paper (BALTZER, 1982) analyses the conditions under which the emplacement and transformation of sediments occurred.

The sedimentary prism which began with fluvial deposition evolves into a ria sedimentation under the influence of the rise of sea level during the Holocene. Subsequently, the deposits become deltaic towards 5 000 BP as a result of a temporary recession of the relative sea level. Today, a very limited Holocene transgression seems to continue (fig. 1).

Modern sedimentation is fed mainly by the erosion of the residual phase of massifs of peridotites which are very rich in secondary minerals (mainly iron hydroxides) and contain accessory unweatherable primary minerals (serpentine and chromiferous spinel) and minerals likely to be unaffected by weathering (enstatite and peridot). Secondarily,

minerals such as serpentine, talc, secondary quartz and amorphous silica are reworked by the erosion of downslope profiles. The stream waters, enriched in silica and magnesium by leaching, supply downstream mineral precipitations of quartz, smectites and carbonates or biological products such as diatoms and mollusks which increase the detrital fraction in variable proportions.

#### *The Dumbea delta and its sediments (fig. 2)*

The modern delta is composed of a main channel lined with natural levées which extend into the ria. On both sides, there are two lateral depressions which are occupied by marine swamps and their drainage system leading to a main channel (left bank) or a bay (right bank).

The sediments found in levées are silty sands composed mainly of ferruginous pseudoparticles sometimes including small veins of quartz or serpentine together with enstatite, quartz and antigorite. Silts and clays are found in lateral depressions. Their mineralogical composition includes iron hydroxides rich in adsorbed silica along with antigorite, a little talc, kaolinite (degradation of aluminous rocks of the peridotite family) and traces of smectite. An organic fraction is abundant in lateral depressions since vegetal matter attains 50 % of the dry weight in mangrove soils, silica of diatom frustules reaches 10 % and calcium carbonate several %.

The emplacement of sediments is a function of three complementary processes, i.e. the dynamic evolution and ecology of marine swamps, the direct evaluation of cyclonic floods and finally the interpretation of the grain size evolution of sediments.

The dynamic evolution of swamps revealed by plant zonation permits a relative dating of their various elements. In the case of the Dumbea, it shows that the development of the swamps began earlier and is almost completed in the lateral depression of the left bank, while it began to develop more recently in the lateral depression of the right bank (fig. 2) and are still developing. Moreover, these studies show that mangroves are supplied with nutrients and sediments both by river floods from the estuary and by tides from bays and channels. Sediments deposited by floods give rise to levées by covering the oldest mangrove soils, while marine sediments cover their recent outer fringe.

Plant zonation is utilized as a means to evaluate the soil topographic level in swamps and to forecast the distribution of geochemical conditions (redox

potential, pH and salinity) in waterlogged soils. The geochemical evolution overlaps the historical evolution determined through an ecological and hydrodynamic approach.

The direct evaluation of the consequences of cyclonic floods (direction of currents, morphology of the flood wave, wasted energy, thickness and grain size of sedimentary deposits) shows that these play a leading role in the formation of a delta such as the Dumbea. The deltaic morphology resulting from the previous floods is reproduced and developed by the thickness, grain size and distribution of the deposits of each flood. Vegetation (mangrove, salt meadows, levées and fresh water forest swamps) slows down in a very efficient way the most violent currents leading to the retention of fine particles. The river deposits fine silty sands on the levées occupied by *graminaceae*, and clays in the lateral depressions occupied by mangroves. It is observed that these deposits are accompanied by a loss of gravity energy which, without any vegetation, would be sufficient to carry pebbles.

The sampling of sediments deposited by an exceptional flood (rainfall record over at least 15 years in most places) as well as a sound experience of the methods of interpretation developed at Orsay by A. RIVIÈRE and our team led the author to study thoroughly the relations between grain size and the conditions of deposition.

The author designated as the « grain size evolutionary sequence » the successive sediments which were left by the same flood along the same line of flow or the same transect. The grain size of the evolutionary sequence reveals the interactions between particles of various sizes (silts trapped by sands or clays trapped by silts) and the existence of nanoparticles trapped in the interstices of silts and clays.

Another result obtained by the study of the grain size evolutionary sequences demonstrated how granofacies are formed in natural suspensions in the course of transport and why they are good criteria for the energetic conditions of the environment. From a geodynamic point of view, this relationship between granofacies and energetic conditions shows first that there are two major trends of sedimentary supply in mangroves which are the overflow of floods and the tides in bays and channels which were already shown by the direct observation of floods and the interpretation of the plant zonation. Moreover, the relation between grain size facies and energetic conditions allows to reconstruct the evolution of these conditions over time throughout the whole delta and to connect those with the variations in the depth of the ria which were inferred from our studies of the marine paleolevels of the Holocene (fig. 3).

#### *The transformations suffered by sediments once they have been deposited*

In the swampy deltaic zones, the development of mangroves enriches soil with organic matter through root penetration and sedimentation of the vegetal matter. The maximum enrichment is observed in the old zones of active swamps where accumulation took a long time and microbial degradation of organic matter has destroyed only the most unstable compounds.

This enrichment in organic matter and the microfloras related to its degradation lead to a particular arrangement of soil permeability, water movements and pH and Eh conditions. In swamps, these conditions lead first to the decrease of sulphates in interstitial waters, to the formation of metal sulphides and to the degradation of detrital minerals (silicates and hydroxides) and bioclastical elements such as diatom frustules and mollusk shells. In the normally emerged zones such as levées and hypersaline swamps, the interstitial deltaic waters evaporate under the influence of the arid climate. The products released by dissolution in mangrove soils are associated with the neoformation of quartz, sulphates, hydroxides and carbonates which are closely dependent on oxido-reduction.

#### *Movement of interstitial waters in swamps (fig. 4)*

The mangrove soils richest in organic matter assume the form of peats which absorb the flood waters which are later released slowly during the ebb. Part of this water percolates towards the outer fringe of the mangrove and finally flows through the network of tidal channels. The other part percolates towards the terrestrial fringe of mangroves in order to replace water evaporated by the arid climate. This accounts for the transport of mineral matter from the center towards the inner margin of mangrove swamps. The water table is originally replenished with a water whose chlorinity is lower than that of seawater, because fluvimarine waters are generally stratified on this coast. However, this water is concentrated towards the terrestrial fringe of mangroves and even beyond it, and the environment becomes hypersaline, exhibiting a salt meadow vegetation, a zone covered with an algal mat and even a zone without any vegetation.

#### *Conditions of oxido-reduction and pH*

All mangrove soils are reducing, except in the surface soil layer where the Eh is close to 0 or slightly positive. This layer, whose Eh is close to 0, thickens considerably in the central part of the mangrove mainly because of fresh waters which replenish the water table.

On the contrary, conditions are systematically oxidizing in the hypersaline zone and in the levée soils. The contact zones are identified by Eh close to 0.

pH are neutral or slightly acid in mangroves, while they tend to be basic in the hypersaline zone.

#### *Localization of phenomena of sulphate reduction and mineral degradations*

Sulphate reduction is particularly active in the central part of the mangrove through which brackish waters infiltrate. The iron deposited in the form of hydroxide inherited from ferrallitic soils is dissolved to give ferrous iron and minerals which are trapped into this gangue are released (photograph 2). Once iron has been put in solution by the water table, it is redeposited in the form of framboids (photograph 3) and pyrite octahedra (photograph 4), which results in a concentration of total iron in the zone of most active water infiltration. In the same environment, very fine clays, antigorite and diatom frustules (photograph 5) are attacked and there release their silica to the interstitial water with a concentration likely to reach 200 ppm. In the case of diatoms, dissolution seems to be favoured by humic acids of the mangrove soil. The latter seem to act as chelates which block iron and lead to the formation of a silicate film around frustules, thus protecting them from dissolution.

#### *Neoformations*

Interstitial water percolates from soils of the central mangrove towards the terrestrial fringe of mangroves and hypersaline swamps. Therefore, its chlorinity is increased threefold while its silica content decreases from 200 ppm to 13 ppm in the

zone where the Eh is close to 0, thus indicating the transition from the reducing zone to the oxidizing zone. Scanning electron microscope and optical microscope studies (as far as fluid inclusions are concerned) reveal that quartz is being formed along this path (photographs 6 and 7); moreover, X-ray diffraction and A.T.D. show that a ferriferous smectite is being formed in the zone of Eh close to 0 where the silica content of the interstitial water falls to 13 ppm.

Thus, these silicate neoformations seem to be governed by the conditions of oxido-reduction. Although iron is ubiquitous, it can react with silica in order to form smectite (nontronite) only if the Eh allows large quantities of it to be put in solution. It is retained either in the structure of pyrite if Eh is too low or in the form of an hydroxide if it is too high. In both cases, silica is deposited in the form of quartz.

#### *Conclusion*

The role played by the climate is essential because this tropical climate with alternating seasons contributes to the hydrolysis of crystalline rocks. Furthermore, it contributes to the highly erosive floods in higher altitudes as well as the concentration of interstitial waters by evaporation, and the development of mangroves in lowlands. It is also necessary to have ultrabasic geochemical conditions near sea level. It may seem difficult to attain all these factors, but once this is achieved, the transformations are so dynamic that they become rapidly significant from a geological point of view, as demonstrated in the ultrabasic catchment basins of the western coast of New Caledonia.

#### BIBLIOGRAPHY

This text is the summary of a thesis published by F. BALTZER. A detailed bibliography will be found in it (see references above).

Frédéric BALTZER. — Осаждение и ранний диагенез по берегам с Мангровыми зарослями ниже ультраосновных массивов в новой Каледонии (Государственная докторская диссертация, факультет Орсэ, 1-го июля 1980 г.).

*Traduit du français par le C.N.R.S.*

**Резюме.** — На западном берегу Новой Каледонии, осадки образуют небольшие дельты на дне риасов, выработанных в течение морских регрессий четвертичного периода. Дельты возникли к концу голоценовой трансгрессии, меньше 5 000 лет тому назад. Крупнейшие из них были построены с продуктами эрозии альтеритов от ультраосновных массивов. В самом деле, под влиянием тропического климата с чередующимися сезонами, который преобладает на острове, эти относительно высокие и обширные массивы — глубоко изменены (TRESCASES, 1973) одновременно из-за податливости перидотитов к изменению, так же, как из-за выщелачивания, происходящего из орографического режима дождевых осадков, достигающего несколько метров на вершинах.

Наоборот, береговые равнины и приморские болота подвержены гораздо более сухому климату с ежегодными осадками около 1 000 мм и средней температурой, равной более 23 градуса. В этой области, условия солености почвы — пресноводные в окрестностях береговой равнины, а солоноватые до морских в мангровых болотах; однако, между двумя типами среды, в верхней части приморских болот, они становятся сверхсолеными.

В течение недавной четвертичной истории, осадки этих дельт были подвержены разнообразным геодинамическим факторам, что сначала оказали влияние на их осаждение (морские уровни, тектоника, заросли, паводки), и потом на геохимические преобразования, произошедшие после их осаждения (изменение, окремнение, обогащение органическим веществом).

Настоящая работа имеет целью (BALTZER, 1982) исследование всех этих условий осаждения и дальнейшего преобразования осадков.

Вследствие поднятия морского уровня во время голоценового периода, осадочная призма, начинаясь с речных отложений,

потом приступает к осаждению риасового типа. Наоборот, тот факт, что, около 5 000 лет до н.э., отложения принимают вид дельты относится к временному понижению относительного морского уровня. В настоящее время, хотя она очень замедлена, голоценовая трансгрессия возможно все еще продолжается (рис. 1).

Современное осаждение прежде всего снабжено продуктами эрозии остаточной фазы массивов перидотитов, которая изобилует вторичными минералами (особенно гидратами оксида железа) и дополнительно содержит неизменяемые первичные минералы (серпентин, хромовая шпинель) и случайно неизмененные первичные минералы (энstatит, перидот). Вторично, выветривание профилей подошв склонов приносит минералы (серпентин, тальк, вторичный кварц, аморфный кремнезем). Речные воды, обогащенные кремнеземом и магнием вследствие выщелачивания, ниже питают минеральные (кварц, смектиты, карбонаты) или биологические (диатомовые водоросли, моллюски) осадки, соединяющиеся в разных пропорциях с обломочной фракцией.

Пример дельты и ее осадков : дельта р. Думбеа (рис. 2)

Настоящая дельта состоит из главного русла, находящегося между двумя естественными осадочными дамбами, составляющими выступ суши по направлению риаса. По обе стороны распространяются две боковые впадины, занятые приморскими болотами; их дренажная система устроена вокруг главного русла (на левом берегу) или залива (на правом берегу).

Дамбовые осадки состоят из илестого песка, в котором преимущественно находятся железистые псевдочастицы, иногда пройденные прожилками кварца или серпентина и также содержащие энстатит, кварц и антигорит. Осадки боковых впадин состоят из илов и глин, минералогическое составление которых присоединяет к гидратам оксида железа, изобилующим адсорбированным кремнеземом, антигорит, небольшое количество талька, каолинита (деградация глиноземистых г. п. группы перидотитов) и следы смектита. Осадочная фракция биологического происхождения имеется в большом количестве в

боковых впадинах, так как растительное органическое вещество достигает до 50 % сухого веса в почвах мангровых болот, кремнезем фрустул диатомовых водорослей — до 10 % и карбонат кальция — несколько процентов.

Процесс осаждения разъяснили путем трех дополнительных подходов : динамическая эволюция и экология приморских маршей, непосредственная оценка циклонических паводков и, наконец, интерпретация гранулометрической эволюции осадков.

Динамическая эволюция болот, выявленная путем зональности растительности — угодная для составления относительного датирования разных их элементов. Что касается до дельты р. Думбеа, то она показывает, что развитие болот древнее и практически завершено на боковой впадине левого берега ; наоборот, оно недавно началось и все еще осуществляется на боковой впадине правого берега (рис. 2). К тому же, этими исследованиями доказано существование двойного питания мангровых болот нутриентами и осадками путем речных паводков от эстуария и путем приливов от заливов и русел. Осадки, принесенные паводками строят дамбы покрываая самые древние почвы мангрового болота в то время, как морские осадки покрывают их недавно образованную внешнюю кайму.

Анализ и интерпретация зональности растительности являются угодным способом оценки топографического уровня почвы в болотах и способом прогнозирования распределения геохимических условий («редокс» Eh потенциал, pH, соленость) в водонасыщенных почвах. Эволюция, предполагаемая после исследования геохимических условий замечательно подтверждается прошлой эволюцией, выявленной путем экологического и гидродинамического подхода.

Непосредственное измерение эффектов циклонических паводков (направление течений, морфология паводковой волны, рассеянная энергия, мощность осадочных отложений) указывает их преобладающую роль в формировании такой дельты, как дельта р. Думбеа. Толщина, гранулометрия и распределение отложений каждого паводка воспроизводят и расширяют дельтовую морфологию, приобретенную во время предыдущих паводков. Растительность (мангровы, солончаковые луга, дамбы, пресноводные лесные болота) очень эффективно ослабляет самые бурные течения и позволяет задерживать мелкие частицы. Реканосит мелкий илистый песок на дамбы, заросшие злаками и наносит

глину в боковые впадины, занятые мангровами. Расчет показывает, что эти осаждения сопровождаются расходом притягательной энергии которая, в отсутствии растительности, была бы достаточной, чтобы перенести гальку.

Из-за того, что я смог отобрать образцы осадков тотчас после их осаждения чрезвычайным в человеческом масштабе паводком (рекордные атмосферные осадки по крайней мере в 15-летний период в большинстве местностей), так же, как из-за достаточной практики интерпретационных методов, разработанных на факультете Орсэ профессором А. Ривьер и нашей группой, я решил вникнуть в вопрос отношений между гранулометрией и условиями осаждения.

Гранулометрической эволюционной последовательностью я назвал последовательность осадков, нанесенных одним паводком по одной линии течения или одному разрезу. Гранулометрия эволюционных последовательностей выявляет взаимодействие частиц разных размеров (захват илов песками или глин илами) и существование наночастиц, задержанных в промежутках илов и глин.

Исследование гранулометрических эволюционных последовательностей также показало, как гранофации образуются в природных суспензиях во время переноса и почему они являются хорошими индикаторами условий энергии среды. В области геодинамики, такое соотношение с условиями энергии прежде всего выявляет существование двух крупных направлений переноса осадков в мангровы (наводнение заливов и русел из-за паводков и приливов), уже частично обнаруживаемых непосредственным наблюдением паводков и интерпретацией растительной зональностью. К тому же, соотношение гранулометрических фаций и условий энергии позволяет воспроизвести эволюцию этих условий в прошлое время во всей дельте и находить их отношение к изменениям глубины в риасе, указанным нашими исследованиями по голоценовым морским палеоуровням (рис. 3).

#### Преобразования осадков после их осаждения

В болотистых дельтовых районах, развитие мангровых зарослей обогащает почву органическим веществом благодаря проникновению корней и превращению растительного вещества в осадки. Наибольшее обогащение наблюдается в старых частях активных болот, где осаждение больше всего продолжалось и где микробный распад органического веще-

ства до сих пор только разрушил наиболее легко употребляемые соединения.

Такое обогащение органическим веществом и микрофлоры, содействующие его распаду увлекают с собой особенное устройство проницаемости почв, движения вод и условий рН и Eh. В болотах, эти условия прежде всего увлекают с собой восстановление сульфатов поровых вод и образование сульфидов металлов, и потом распад минералов обломочного происхождения (силикаты и гидроокиси) и биокластического материала (фрустулы диатомовых водорослей раковины моллюсков). В нормально выступающих зонах (дамбы, сверхсоленые болота, вода дельтового водоема испаряется под влиянием сухого климата. Продукты, освобожденные растворениями в мангровой почве здесь участвуют в минеральных новообразованиях кварца, сульфатов, гидроокисей и карбонатов, тесно связанных с окислительно-восстановительными условиями.

#### Движение поровых вод в болотах (рис. 4)

Почвы мангровых зарослей с наиболее высокими содержаниями органического вещества принимают вид торфов, абсорбирующих воду прилива и постепенно выпускающих ее в течение отлива. Часть этой воды просачивается к внешней кайме мангровых зарослей, и наконец вытекает по системе приливных русел. Остальная часть просачивается к кайме мангровых зарослей, направленной к сушке чтобы компенсировать испарение, причиненное сухостью климата. Это объясняет перенос минерального вещества от центральной зоны к внутренней кайме мангровых болот. Так, как речные и морские воды обычно наслаждаются вдоль этого берега, то уровень восстановлен водой, хлорность которой вначале ниже хлорности морской воды. Однако, эта вода концентрируется в направлении к почвенной кайме мангровых зарослей и, дальнее, среда становится сверхсоленой и характеризуется присутствием солончаковых растений, и потом тонким слоем водорослей, а даже иногда отсутствием растительности.

#### Окислительно-восстановительные и рН условия

Окислительно-восстановительные условия оказывают восстановительное влияние во всех мангровых почвах, кроме поверхностного слоя почвы, где Eh - близкие к 0 или

легко положительные. Этот слой с Eh, близкими к 0 утолщается в центральной части мангровых зарослей под действием инфильтрации пресной воды, дополняющей уровень водоема.

Наоборот, условия - систематически окислительные в сверхсоленой среде и в почве дамб. Контактные зоны характеризуются Eh, близкими к 0.

Значения рН указывают на нейтральные или легко кислые мангровые почвы; они скорее основные в сверхсоленой области.

#### Локализация процессов восстановления сульфатов и распадов минералов

Процесс восстановления сульфатов особенно активный в центральной части мангровых зарослей, через которую просачиваются солоноватые воды. Железо, осажденное под видом гидроокиси, унаследованной от ферралитов, растворяется и становится двухвалентным, и минералы, вмешанные в этой оболочке освобождаются (снимок 2). После своего растворения водной поверхностью, железо снова осаждается под видом пиритовых фрамбоидов (снимок 3) и октаэдр, что увлекает за собой концентрацию валового железа, сосредоточенную в области наиболее активных инфильтраций. В той же самой среде, ультратонкие глины, антигорит и фрустулы диатомовых водорослей (снимок 5) разъеданы и освобождают свой кремнезем в воде водоема до концентрации 200 частей на миллион частей. Что касается диатомовых водорослей, то кажется, что растворимость способствовано гуминовыми кислотами мангровой почвы. Кажется, что последние действуют как хелатные соединения, удерживающие железо и таким образом причиняют формирование силикатной оболочки вокруг фрустул чтобы их защитить от растворения.

#### Новообразования

В течение просачивания от почв центральных мангровых зарослей к земной кайме мангровых зарослей и, наконец, сверхсоленой среде, содержание хлора поровой воды утраивается пока ее содержание кремнезема постепенно падает от 200 до 13 ч. на м. в зоне значений Eh, близких к 0, указывающих на переход из восстановительных условий в окислительные условия. Наблюдения под сканирующим электронным микроскопом и оптическим микроскопом (для жидких включений) выявляют образование кварца

(снимки 6 и 7) вдоль этой пути ; рентгенограммы и ДТА указывают на образование железосодержащего смектита в зоне значений Eh, близких к 0 где содержание кремнезема поровой воды падает до 13 ч. на м.

Таким образом, кажется, что эти силикатные новообразования зависят от окислительно-восстановительных условий. Железо-вездесущее, но оно может вступать в реакцию с кремнеземом чтобы формировать смектит (нонтронит) лишь если значение Eh позволяет его растворение в достаточном количестве. Оно удержано либо в структуре пирита если значение Eh слишком низкое, либо под видом гидроокиси если значение — слишком высокое. В обеих случаях, осаждение кремнезема только принимает вид кварда.

#### Заключение

Климат играет важнейшую роль в этой эволюции : тропикальный климат, с чередую-

щимися сезонами, пригодный для гидролиза кристаллических пород, сильно выветривающих паводков на склонах так же, как и концентрации вод водоемов путем испарения и развития мангровых зарослей в низовьях. Подходящие геохимические условия — ультраосновность — и адекватный морской уровень также необходимы. Сочетание всех этих факторов, возможно, кажется редким но, когда оно осуществляется, то изменения, претерпленные осадками — так скоро прои-  
сходят, что они приобретают несомненное геологическое значение, как представилось в ультраосновных водохранилищах на западном берегу Новой Кaledонии.

#### Литература

Этот текст резюмирует недавно опублико-  
ванную диссертацию, написанную F. BALTZER  
(смотрите на вышеуказанные ссылки). В ней  
находится подробная литература.