

4.3 Dissolved and particulate load of African rivers – an overview

O. Martins and W. Salomons

Abstract

This article gives a synthesis of available information and the extent of knowledge on the most important river basins in Africa. River discharge data covering between one year and almost forty years are considered in assessing the average water export to major world oceans by 50 rivers draining different geographic regions in the continent. Based on available information, chemical characteristic of surface river waters are summarized; sediment transport and mechanical erosion rate from the continent to the seas are also reviewed. The most important rivers in terms of discharge, are located in West and Central Africa with a total water export of 3700 km³/yr and a combined sediment load of about 100 million tons/yr. Generally, the rivers are low in dissolved mineral content: dissolved silica and bicarbonate ions represent over 60% of dissolved species. Organic matter content of major rivers, as indicated by organic carbon and nitrogen loads in dissolved and particulate fractions, are evaluated, stressing the relative role of dams and reservoirs in all the rivers.

Key words Drainage basins - river discharges - water types - sediment load - organic - carbon - amino acids

Introduction

With an area of 30×10^6 km², the African continent ranks third among the earth's land masses. About 35% of the surface is drained by six rivers (Congo, Nile, Niger, Zambezi, Limpopo and Orange), and about as much as 10×10^6 km² of the surface is arid and desert area without surface drainages. In all, there are over 70 rivers on the continent whose drainage basins are greater than 10,000 km², located among over 40 countries (Figure 1).

Relative to other rivers of the world, very little is known about the flux of dissolved and particulate load of African rivers. The most recent information was catalogued under the auspices of a SCOPE project on mineral and carbon transport of major world rivers (Degens *et al.* 1991), where the emphasis was on a minimum 12-month sampling period of four of the largest drainage basins (Martins, 1983; 1988a and b; Kempe 1983; Nkounkou and Probst 1987; Hart 1985). Other studies carried out on smaller basins, the Senegal and Gambia Rivers, were published by Gac and Kane (1986a and b) and Lo (1984). More recently, Dupre *et al.* (1996) presented a study of major and trace elements of the Congo from a one-month cruise in 1989.

Dissolved and particulate fluxes of rivers are controlled by the nature and quantity of material within the basin, introduced into it by weathering, physico-chemical and biological processes operating on the rocks and within the aquatic medium at different rates and to varying degrees. These inputs and the controlling processes exhibit seasonal and inter-annual variations that are often difficult to comprehend because of the influences of the various factors. Thus, the amount of water transported by rivers is controlled mainly by dominant climatic type, while the lithology determines the chemical nature of the river water. River basins within the tropical rainforest belt therefore have high discharges, particularly where the basin is extensive (the Congo) and basins predominantly covered by sedimentary rocks have higher dissolved salt concentration than those of crystalline rocks. The effect of topography on the chemical composition of river water is closely linked to the frequently observed distribution of rocks, whereby sedimentary rocks are found mostly in mountainous areas, while crystalline rocks are widespread in lowland areas. Changes in land-use pattern, occasioned by man, influence the quality and quantity of river loads through:

- Discharge of domestic and agricultural wastes (organic matter, carbon, nitrogen and phosphorous compounds);
- Discharge of industrial wastes (trace metals, organic compounds);
- Urbanization, deforestation, canalization, dredging and mining, leading to enhanced mechanical erosion in the river basins and increased sediment load transport.
- Damming, and irrigation (water abstraction).

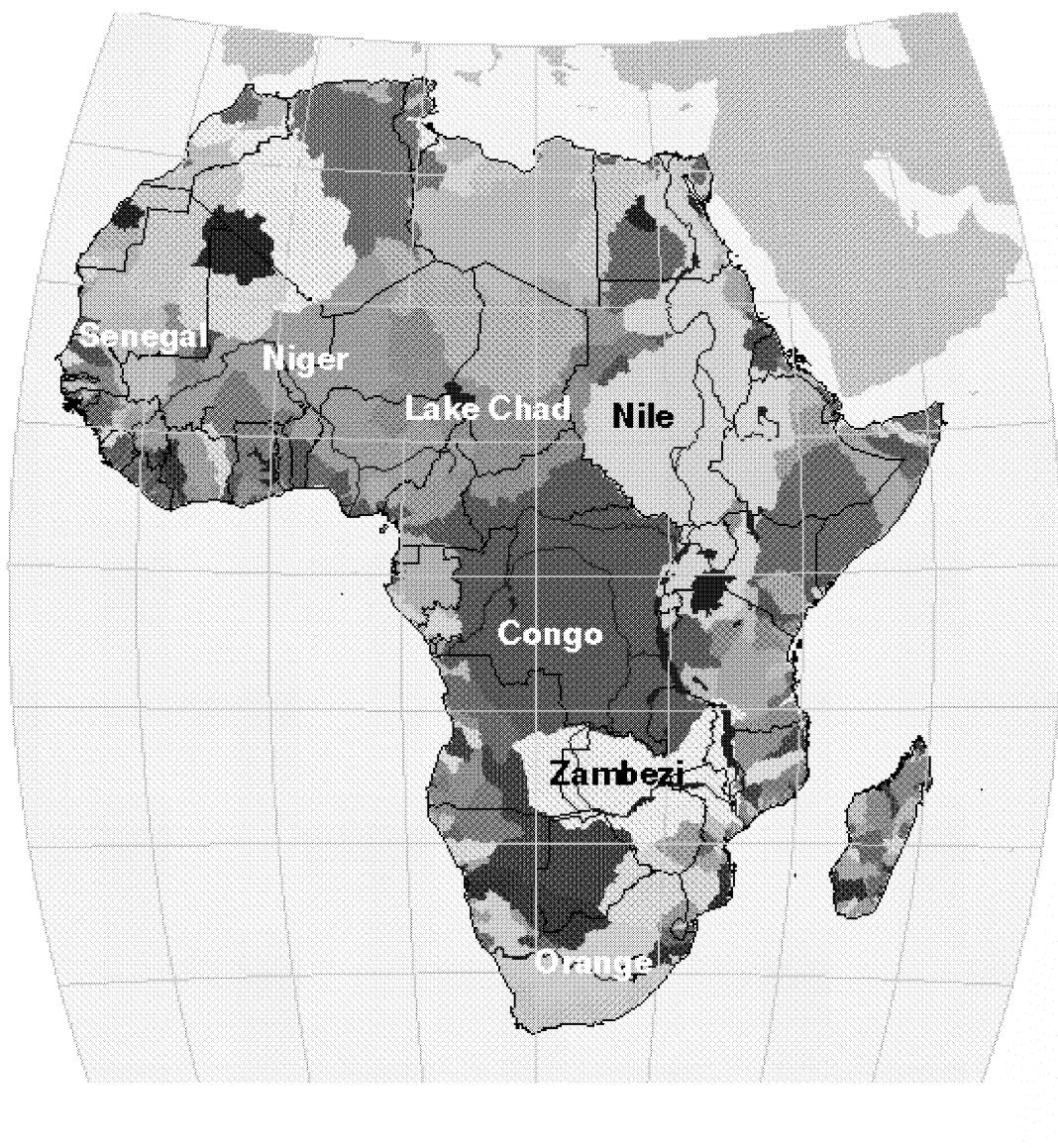


Figure 1. Africa's drainage basins superimposed on country political boundaries.
(from USGS 1996).

Table 1. Some hydro-climatic characteristics of major drainage basins in Africa.

River	Watershed area (10^6 km^2)	Mean Maximum elevation (m)	Major climatic type	Precipitation (mm yr^{-1})	Evapo-transpiration (mm yr^{-1})
Congo	3.7	1100	Tropical rainforest	1543	1150
Nile	3.0	1590	Arid	693	683
Niger	2.1	820	Semi-arid	558	423
Orange	0.95	1650	Semi-arid	419	408

Vegetation, geology and soils

Vegetation and soils are a direct derivative of the interplay between climate and rock types. Vegetation type reflects the soil potential: thus, desert soils are shallow and lacking in organic material, while areas with 250–600 mm yr⁻¹ of rainfall have ferruginous soils which may be slightly acidic, if heavily leached. Due to the configuration of the drainage basins, a given vegetation belt may be found in two or more watersheds. Thus, tropical rainforest is found in the Niger delta and most of the Congo basin, while the tropical savannah zone covers most of the Niger basin, the south-east Congo basin, the Senegal and Gambia basins and the upper part of the Nile basin. Steppe and desert belts characterize the Nile and Orange drainage basins.

The lithologic outline is dominated by the Precambrian Basement Complex, consisting of granite gneisses, overlain by a thin layer of sedimentary rocks (<300 m thickness). Marine clays and coal-bearing continental deposits accumulated in southern and central Africa, while the northern sector is buried by clastic sediments (Continental Intercalaire), which include Nubian sandstone and various porous layers. In line with the relatively simple geology, the chemical composition of the dominant rocks (Table 2) is similar. Notable differences are in the SiO₂ content, where the Senegal and Gambia basins have higher percentages than the Niger, while the Niger shows more Al₂O₃ content.

Table 2. Average chemical composition (% oxides) of dominant rocks (Orange 1990).

Drainage Basin	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	FeO	MgO	CaO	Na₂O	K₂O	TiO₂	MnO	P₂O₅
Senegal	86.0	5.0	2.0	1.4	1.0	1.5	0.82	0.53	0.29	0.03	0.05
Gambia	80.5	6.2	2.4	2.7	1.8	2.9	0.87	0.51	0.49	0.06	0.08
Niger	66.7	15.2	1.9	2.1	1.7	2.7	3.9	2.5	0.48	0.03	0.13

Methodology

Data sources

Most of the data presented were generated in the course of the SCOPE-sponsored project on carbon and mineral transport of major world rivers (Degens *et al.* 1991). Almost all river discharge data are extracted from the global river discharge database (Vörösmarty *et al.* 1996).

Laboratory analyses

Major ion analyses correspond to the recommended standard analytical methods using the AAS, while particulate matter was mostly collected by filtering 100 ml to 500 ml of homogenized water through pre-combusted and pre-weighed 25mm diameter Whatman GF/F filters clamped in a vertical filter tower, under reduced vacuum. Filters were dried and reweighed to determine the total suspended solids contents. The filtrate was collected and stored in conditioned PVC bottles and preserved with HgCl₂. Filters and filtrate were analyzed for organic components at the SCOPE/UNEP International Carbon Unit in the University of Hamburg. Details of the methods of analyses are described in Michaelis and Ittekkot (1982).

Results and discussion

Hydrology

Undisturbed flow in African rivers is characterized by seasonal and inter-annual variation; basins located in the northern hemisphere (Senegal, Gambia, Niger and Nile) have low flows between December and April, while the flood period in rivers from the southern hemisphere (Orange, Limpopo, Zambezi and Congo) occurs between March and June. The flow of most African rivers has been modified over the years by natural changes, such as frequent drought occurrences in the arid- and semi-arid-dominated basins and by changes in land-use pattern, such as large irrigation schemes and hydroelectric power plants through impoundments. The net effect is reduction in annual water volume reaching the adjoining seas.

Table 3. Station-specific river discharge data (Vörösmarty *et al.* 1996; Olofin and Martins 1993; Martins and Awokola 1996).

River	Country	Total drainage basin (km ²)	Station	Drainage area upstream (km ²)	Mean water volume (km ³ yr ⁻¹)	Years of data
Nile	Egypt	3.04x10 ⁶	Asyut	3.0 x 10 ⁶	38	1973-1984
Ouergha	Morocco		Ourtzagh	4 404	1.1	1951-1989
Bouregreg	Morocco		Lalla Chafia	3 230	0.08	1980-1984
Sebou	Morocco	38 402	Azib Soltane	17 250	1.2	1959-1989
Oum er Rebia	Morocco	34 000	Dechra el Oued	3 330	0.57	1953-1989
Moulouya	Morocco		Dar el Caid	24 422	0.37	1957-1988
Gambia	Senegal	70 000	Gouloumbu	42 000	4.6	1976-1979
Senegal	Senegal	437 000	Bakel	218 000	9.9	1904-1984
Cassamance	Senegal		Kolda	3 700	0.029	1967-1983
Moa	Sierra Leone	22 635	Moa-Bridge	17 150	19.0	1976-1977
Cestos	Liberia	15 011	Sawolo	683	0.8	1976-1983
Sehnkwehn	Liberia		Tounouta-Bafu Bay	761	3.5	1976-1978
Sassandra	I'Coast	68 000	Soubre	62 000	17.0	1979
Cavally	I'Coast	30 575	Tate	28 800	18.0	1979
Bandana	I'Coast	97 500	Tiassale	61 850	5.0	1979-1983
Tano	Ghana	15 975	Alenda	15 975	5.2	1965-1978
Pra	Ghana	24 588	Dab oasis	22 714	4.2	1965-1978
Volta	Ghana	414 000	Senchi	394 100	27.6	1936-1979
Mono	Benin	23 430	Anthiem	21 575	2.0	1944-1984
Oueme	Benin	59 000	Bonou	46 990	1.4	1948-1984
Niger	Nigeria	2.12x10 ⁶	Onitsha	2.1x10 ⁶	127	1982-1986(a)
Ogun	Nigeria	22 000	Mokoloki	22 000	3	1978-1996(b)
Wouri	Cameroon		Yabassi	8 026	9.2	1951-1977
Nyong	Cameroon	26 480	Dehane	26 400	12.1	1951-1977
Cross	Cameroon	53 000	Mamfe	6 810	15.1	1967-1979
Sanaga	Cameroon	135 000	Edea	131 520	56	1943-1980
Nyanga	Gabon	24 704	Ibanga	20 000	17.3	1965-1974
Ngounie	Gabon		Fougamou	22 000	22	1965-1974
Congo	Congo	3.7x10 ⁶	Brazaville	3.5 x10 ⁶	1 269	1971-1989
Kouilou	Congo	61 707	Sounda	55 010	26.6	1969-1982
Ogooue	Gabon	223 429	Lambarene	203 500	146	1930-1975
Ivindo	Gabon		Loa-Loa	48 500	23.8	1965-1974
Orange	South Africa	948 000	Vioolsdrif	0.850x10 ⁶	5.9	1964-1986
Tugela	South Africa		Mandini	28 920	2.1	1964-1986
Grout-Vis	South Africa		Outspan	29 745	0.21	1969-1986
Maputo	Mozambique	31 272	Madubula	28 500	1.1	1976-1979
Zambezi	Mozambique	1.39x10 ⁶	Matundo Cais	0.94x10 ⁶	80	1976-1979
Save	Mozambique	107 293	Villafranca do Save	100 885	5.6	1976-1979
Limpopo	Mozambique	416 000	Chokwe	342 000	16.5	1976-1979
Buzi	Mozambique	27 865	Estaqueinha	26 314	12	1976-1977
Imkomati	Mozambique	46 000	Chobela	37 600	3.3	1976-1979
Mangoky	Madagascar	60 263	Bevoay	53 225	21.2	1952-1983
Mananara	Madagascar		Maroangatany	14 160	7.3	1965-1978
Mandare	Madagascar	16 866	Amboassary	12 435	1.8	1951-1973
Tana	Kenya	671 000	Garissa	42 217	5.9	1934-1975
Ruvu	Tanzania		Morogoro Rd.	15 190	1.6	1959-1978
Rufiji	Tanzania	809 000	Stigeler's Gorge	158 200	22.6	1954-1978
Mbewe	Malawi		Chiromo	149 500	18.5	1953-1981
Shebelle	Somalia	0.339	Afgoi	278 000	1.6	1951-1979
Juba	Somalia	805 087	Lugh Ganana	179 520	5.7	1951-1979

Table 3 shows a list of important rivers, countries, discharge measuring stations, surface area of basin upstream of station and years of available data. The mean annual water volumes were calculated only for the last 10 years in most cases, as these have bearing on the most recent change in discharge to the

estuaries. The most dramatic changes have occurred in the basins located in the arid and semi-arid regions (Nile, Niger and Orange rivers), influenced by climatic (drought) and damming impacts (increased evapo-transpiration as a result of water surface area increase). The case of the Nile has been well documented (Kempe 1983; Vörösmarty *et al.* 1996). The discharge of the Niger which was 220 km³ in the pre-Kainji dam years, went down to 168 km³ after the inception of the dam (Martins 1983). The water volume was further reduced to 127 km³, as the Jebba dam started operation in 1985 (Olofin and Martins 1993). Similarly, the Orange River now has an annual water volume of less than 6 km³ as against 11 km³ (Hart 1985). Other rivers that may have been affected by reduction in discharge are the Volta and Zambezi rivers due to the large reservoir capacity (Table 4). Water loss and distortion of the natural hydrograph are some of the most important impacts of dams; the proportion of water lost is a factor of the lake surface area and climate. Thus, Lake Kariba (surface area=5200 km²) loses 20% of its inflow to evapo-transpiration, while the Tiga dam in Nigeria with a surface area of only 180 km² losses up to 30% of its inflow by evapotranspiration due to the arid climate.

Inter-annual variations in river discharges are related to the rainfall pattern of the region. For instance, assessments of historical rainfall data for South Africa reveal that rainfall occurrences have been marked by a series of humid and dry years; an 18-year hydro-climatic cycle has been calculated for the southern Africa sector, as against observed 10-year cycle for the western part (Martins 1983). Inter-annual fluctuation amplitudes decrease from the semi-arid zone in direction of the equator. Thus, such hydro-climatic cycles are not pronounced in basins located in the equatorial rainforest zones .

Table 4. Africa's largest man-made lakes.

Name of reservoir	Completion date	River/ Country	Capacity (x10 ⁹ m ³)
Aswan	1970	Nile/ Egypt	164
Kariba	1959	Zambezi/ Zimbabwe	185
Akosombo	1966	Volta/ Ghana	148
Cahora Bassa	1974	Zambezi/ Mozambique	64
Kainji	1968	Niger/ Nigeria	15
Le Roux	1976	Orange (Gariep)/ S. Africa	0.9

Dissolved minerals

Solute contents of rivers are naturally derived from three sources: atmospheric (anions and CO₂), lithologic (rock weathering) and groundwater infiltration (in artesian situations or dry season seepage). Chemical weathering of rocks remains the main source of dissolved substances, its rate being controlled by several factors among which topography, vegetation cover and humidity are primary. The solutes in African rivers are typically of the Ca, NaHCO₃ water type (Figure 2) and are therefore rock-dominated.

From a chemical reaction model, Martins (1988) showed that plagioclase, orthoclase and biotite breakdown accounts for 94% of the total dissolved solids (TDS) in the Niger, while Nkounkou and Probst (1987) concluded that only 24% of the bicarbonates are produced from weathered rocks; 76% of calcium, 69% of magnesium, 26% of sodium and 70% of potassium may have been derived from the chemical decomposition of parent rocks. All the rivers are generally low in TDS, mostly between 60–180 ppm, and they have relatively high Si(OH)₄, fluctuating between 7.0 and 25 ppm.

The seasonal variations in concentration follow a definite pattern in rivers with large floodplains, where an initial dilution of solutes precedes salinity increase as dissolved salts are leached from the floodplains into the main valley. The situation might be different in smaller rivers that dry up completely during 3 to 5 months of the hydrological cycle (Martins and Probst 1991). However, in view of the variability in river water volume, all fluxes of dissolved substances increase with discharge and in highly arid and semi-arid conditions, the flux variability can be very high (Meybeck 1996).

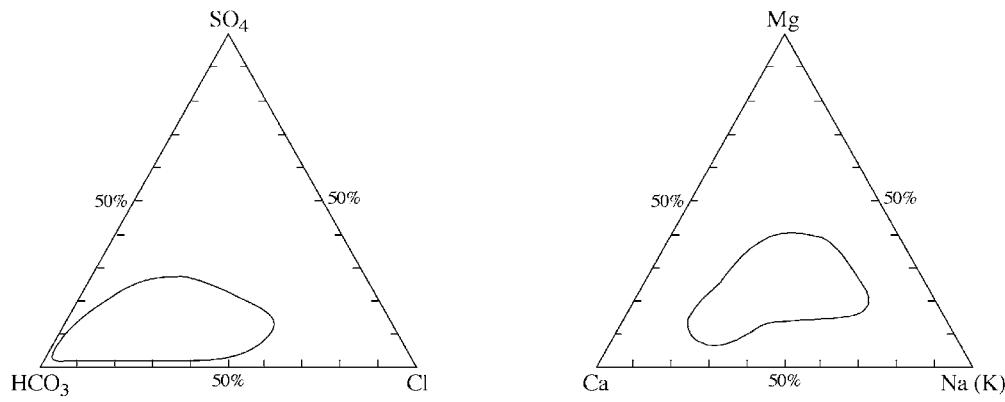


Figure 2. Trilinear plot of major ions in river surface waters

Nutrients

Data on the proportion of nutrients (C, N, P and Si) in African rivers is generally rare. Concentration of nitrogen and phosphorous compounds are generally low, while dissolved inorganic carbon and silica levels are appreciable. Table 5 shows some results on the nutrient content of the Orange River from the Verwoerd dam to the Le Roux dam. The nutrient concentrations are low, and show limited variation, possibly as a result of the impoundments. The proportion of dissolved inorganic carbon and silica are higher than 40% and 20%, respectively, of the total dissolved solids in most African rivers.

Table 5. Dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate, total phosphorous, and total inorganic carbon (all values in ppm) in the Orange River (Hart 1985).

Sites	DIN	PO ₄ -P	TOT-P	TIC
Orange River (above Verwoerd dam)	0.37	0.07	0.42	13.2
Orange River (below Verwoerd dam)	0.74	0.09	0.11	14.7
Lake le Roux (at wall)	0.7	0.06	0.07	14.8
Orange River (below Le Roux dam)	0.7	0.07	0.08	14.9

Suspended sediments

The quality of suspended sediments is determined by geology and weathering type, while their quantity is controlled by topography, vegetation cover and river discharge. The total suspended sediment (TSS) concentration are very low in tropical rainforest rivers such as the Congo (< 40 ppm) and high in semi-arid rivers such as the Niger and Senegal rivers (127 and 196 ppm, respectively). The role of impoundments as sediment traps is evident from the drastic reduction of the concentration of TSS downstream of large dams. The TSS of the Nile before the closure of the Aswan dam was 3700 ppm, as against <1 ppm after the closure of the dam, thus showing a reservoir trapping efficiency of 100% (Milliman and Meade 1983; Vörösmarty *et al.* 1997). Reservoir operations such as in hydroelectric power generation, coupled with the low settling velocity of clay particles, may reduce the trapping efficiency of most dams. Rivers that receive highly discharging tributaries downstream of dams may still have high TSS concentrations when they reach the coastal areas.

The highest water and sediment discharges are exported from the west and central parts of the continent, in spite of the moderate rate of mechanical erosion. Most of the sediments from northern and southern Africa are stored behind dams, while wind erosion may be the predominant mode of sediment transportation in the northwestern and northeastern parts of the continent. East Africa and Madagascar have very high mechanical erosion rate due to altitude and moderate erosive power of the rivers.

Organic matter

Biogeochemical parameters such as organic carbon and organic nitrogen (dissolved and particulate), carbohydrates, amino acids and amino sugars give indication of biomass production within drainage basins. Organic matter content of rivers is controlled by the relative input from soils and from *in situ* primary productivity; the latter is labile and may be decomposed within the water column, while soil-derived organic matter is probably attached to humic materials and thus protected from such decomposition. Since there is significant fractionation, particularly of dissolved organic matter, taking place at the soil-river interface, the riverine organic matter profile may not necessarily reflect that of the soil. Tropical rainforest basins (e.g., the Congo) generate high DOC but remarkably low POC. The Orange and Gambia rivers have moderately higher DOC than POC, while the Niger and the Nile contain equal concentrations of both the dissolved and particulate forms of carbon. Mechanisms related to river geometry, residence times of organic matter in the water column and metabolic activities may also determine the concentration of organic matter of rivers. Some of the processes involved in the release of organic carbon are:

- Leaching of organic compounds from soils at high water stage.
- Accumulation of DOC on floodplains by leaching combined with heterotrophic decomposition of newly flooded terrestrial vegetation.
- Primary production and subsequent processing of fixed carbon in the water.

Since much of the nitrogen carried by rivers is in the form of proteinaceous materials, determinations of dissolved and particulate amino acids on acid hydrolysis should be expected to reveal the approximate quantity and nature of organic nitrogen transported (Ittekkot *et al.* 1983). Most of the rivers have dissolved amino acid in concentrations higher than $500 \mu\text{g l}^{-1}$ and in most cases there are higher concentrations of the particulate fraction except in the Orange River. Amino sugars are also present in the samples from a few traces in the Congo and Orange rivers to about $60 \mu\text{g l}^{-1}$ in the dissolved fraction, and from $5 \mu\text{g l}^{-1}$ to $32 \mu\text{g l}^{-1}$ in the particulate fraction.

The dominant amino acids are aspartic and glutamic acids, glycine and alanine in both dissolved and particulate fractions, while the relative amounts of these amino acids vary from one river to another. In the Orange and Niger, draining semi-arid areas, there is similarity in the distribution of particulate amino acids (PAA). In the dissolved phase, neutral amino acids such as serine and glycine dominate the samples collected from the Orange, whereas in the Niger neutral amino acids are dominated by glycine. Further, neutral and acidic amino acids show equal molar distribution patterns in the Niger. In the Nile, most of the isolated amino acids are in the particulate fraction, with the exception of valine, lysine and arginine. This is because most of the recycling of nitrogenous organic matter has probably occurred within Lake Nasser, so that the nitrogenous organic load of the Nile appears rather stable.

Conclusion

The state of relevant geo-scientific data of African rivers has not witnessed much improvement in the last 25 years. Our knowledge of river water quality has been enriched by two major projects – the SCOPE Project on transport of carbon and minerals in major world rivers and the GEMS-Water programme (jointly launched by UNEP, WHO, UNESCO, and WMO). Efforts to generate and collate data had been going on before these projects and are continuing, but in isolation and without standardization of sampling and analytical methodologies, making interpretation and comparison of results difficult, even on continental scale.

In general, river water quantity monitoring activities are more common and popular in most countries than river water quality measurements. Discharge/gauge monitoring stations are mostly limited to major rivers, dammed sections of rivers, or rivers used for navigation. However, there seems to be a lot of data gathered on individual country basis, by researchers in institutions of higher learning and research centers, but these data are difficult to access. Routine measurements of river water quantity and quality seem to be more common in the northern and southern African countries than in other parts of the continent. Data on major ion concentrations are more frequently found in the literatures than nutrient concentrations, while information on organic matter content of African rivers is generally lacking.

More scientists need to be exposed to continental and intercontinental meetings where recent data can be presented. The development of uniform sampling, monitoring and analytical tools that would enable good quality data acquisition and comparability of results, at least on a continental scale, is urgently required.

References

- Degens, E.T., Kempe, S. and Richey, J.E. 1991 Biogeochemistry of major world rivers. *SCOPE* **42**, 356 pages, John Wiley.
- Dupre, B., Gaillardet, J., Rousseau, D. and Allegre, C.J. 1996 Major and trace elements of river-borne material: The Congo Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **60**(8): 1301-1321.
- Gac, J.Y. and Kane, A. 1986a Le fleuve Sénégal I – Bilan hydrologique et flux continentaux de matières particulières à l'embouchure. *Sci. Geol. Bull.* **39**(1): 99-130.
- Gac, J.Y. and Kane, A. 1986b Le fleuve Sénégal II – Flux continentaux de matières dissoutes à l'embouchure. *Sci. Geol. Bull.* **39**(2): 151-172.
- Hart, R.C. 1985 Aspects of the hydrogeochemistry of the Upper Orange river. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg* **58**: 435-442
- Ittekkot, V., Martins, O. and Seifert, R. 1983 Nitrogenous organic matter transported by major world rivers. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg* **55**: 119-127.
- Kempe, S. 1983 Impact of Aswan High dam on water chemistry of the Nile. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg* **55**: 401-423.
- Lo, H. 1984 Le bassin de la Gambie: Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tropical humide africaine. *Thèse de troisième cycle, Université Nancy, France*.
- Martins, O. 1983 Transport of carbon in the Niger River. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamb.* **55**: 435-449.
- Martins, O. 1988a Solute concentrations in the lower Niger River and source rock contribution. *J. Hydrol. Processes* **2**(1): 19-30.
- Martins, O. 1988b Flux of particulate inorganic matter through the Niger River into the Atlantic Ocean. *Netherlands J. Sea Res.* **22**(2): 91-97.
- Martins, O. and Nurudeen, S.I. 1988 Hydrology and geochemistry of Kainji Lake – a reappraisal. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamb.* **66**: 159-164.
- Martins, O. and Probst, J.L. 1991 Biogeochemistry of major African rivers : Carbon and mineral transport. *SCOPE* **42**: 127-155.
- Martins O Awokola OS (1996) Total dissolved solids of selected rivers in south-west Nigeria. *Nig. J. Mining and Geology* **32**(2): 113-119.
- Meybeck, M. 1996 River water quality, global ranges, time and space variabilities. *Verb. Int. Verein. Limnol.* **26**: 81-96.
- Michaelis, W. and Ittekot, V. 1982 Biogeochemistry of rivers: field and analytical techniques. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamb.* **52**: 69-89.
- Milliman, J.M. and Meade, R.H. 1983 World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.* **91**: 1-21.
- Nkounkou, R.R. and Probst, J.L. 1987 Hydrology and geochemistry of the Congo river system. *Mittl. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg* **64**: 483-508.
- Olofin, E.A. and Martins, O. 1993 Dams and reservoirs- destabilization of some physical and chemical elements of selected Nigerian drainage basins. *Nig. J. Water Resources* **1**(2): 90 –105.
- Orange, D. 1990 Hydroclimatologie du Fouta Djallon et dynamique actuelle d'un vieux terrain lateristique. *Thèse docteur de l'université Louis Pasteur de Strasbourg*.
- Vörösmarty, C.J., Fekete, B., Tucker, B.A. 1996 River discharge database, Version (RivDis v1.0) A contribution to IHP-V Theme 1. Technical documents in Hydrology Series, UNESCO, Paris.
- Vörösmarty, C.J., Sharma, K.P., Fekete, B.M., Copeland, A.H., Holden, J., Marble, J. and Lough, J.A. 1997 The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio* **26**: 210-219.

4.4 Assessment and management program for the journey of pollutants through the River Nile to the Mediterranean Sea

Hassan Awad

Introduction

The River Nile has a large discharge area of about $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ with a high flow rate (up to $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). The flowing Nile River water reaches the Mediterranean Sea directly or indirectly through the drainage effluents network. These effluents are continuously pumped to the sea, carrying a complex of wastes. Quantities and quality of these wastes reflect the variability of human activities carried out in the countries bordering the Upper Nile basin (see Figure 1).

The dramatic deterioration in natural resources of the Egyptian coastal lakes and lagoons especially Manzala and Mariut lakes prove that the impact of pollutant discharges in the Upper Nile could reach the Mediterranean coast through these lagoons. The type, properties and persistence of discharged pollutants in Nile waters are determinant factors for their dispersal, residence and impacts in the receiving aquatic environments (fresh, brackish or saline).

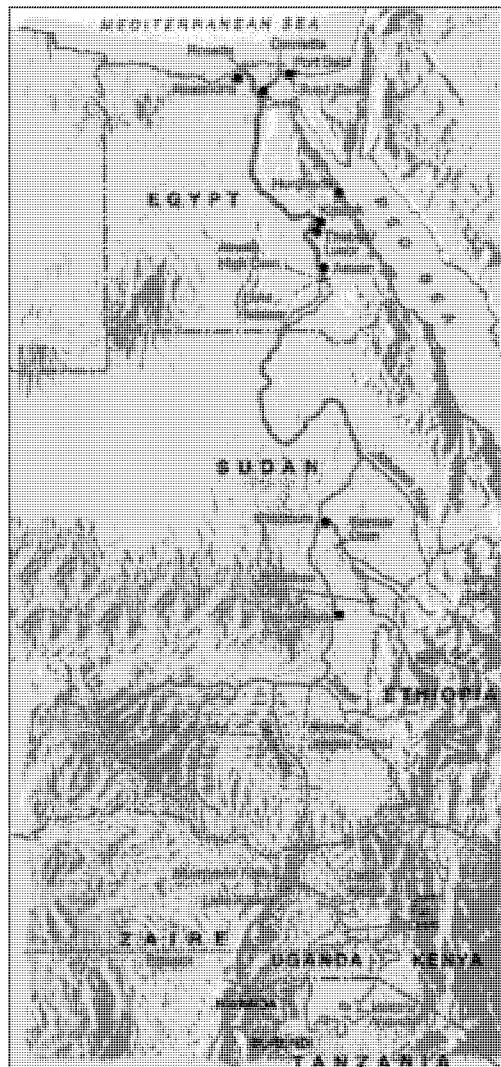


Figure 1. The River Nile and countries bordering its basin.

Changes in the hydrology of the Nile since the construction of Aswan dam play a significant role on the fate of discharged pollutants in the river's environment. Comparison between the suspended and dissolved material contents in Nile water prior to and after construction of the dam showed that while the level of dissolved substances increased, suspended materials decreased. As a consequence, increases were noted in Nile water hardness, rate of alkali metal salts formation and their accumulation rate in the Nile's muddy bed. Meanwhile, the levels of bioavailable phosphate and silicate are decreased causing parallel reduction in water productivity.

On the other hand, although the infamous insecticide DDT has been banned from use in Egypt since 1970, there is evidence of that compound in the Mediterranean in detectable amounts in fish (El-Nabawi *et al.* 1987; Ernst *et al.* 1984), in water and in sediments (El-Gindy *et al.* 1991). In fact, almost all species of fish in Lake Nasser behind Aswan dam are contain high levels of DDT-type residues (160-470 ppb), especially following the spraying season of cotton in Sudan (Sebae 1994).

This paper evaluates the quantity and quality of discharged wastes from their point sources along the Nile River through Egypt and into the Mediterranean Sea via the coastal lagoons.

Industrial waste drainage

In 1991, a map was drawn by the Egyptian Environmental Affairs Agency (EEAA) in cooperation with the General Organization for Industrialization (GOFI) and Friedrich Ebert Foundation of Germany (FEF) for the purpose of assessing the impact of Egyptian industry on the River Nile. This map includes a detailed survey on the relationship between industrial potential and quantity and quality of produced wastes, water consumption and waste dispersal in the Nile. It was estimated that, from the identified principal 140 agglomerated point sources, $312 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$ of untreated industrial wastes are discharged directly into the Nile. The following conclusions were drawn:

- The public industrial sector in Egypt uses a total of $638 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$ of water, about 65% of which are supplied by Nile waters; 57% of the waste water produced ($549 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$) is discharged into the River Nile water systems (stream, branches, canals, drains and lakes).
- More than 60% of the industrial activity is concentrated in Cairo and Alexandria. These two regions are also responsible for the majority of the wastewater.
- The Alexandria region with its 85 large public factories and about 1700 private industrial units discharges $35 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$ of industrial wastes directly into the Mediterranean coastal waters through Lake Mariut. Other wastewater also reaches the Mediterranean coast via the Rosetta branch ($13 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$), canals ($7 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$) and sanitary systems ($33 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$). There is also more than $200 \text{ Mm}^3 \text{ yr}^{-1}$ of raw domestic wastes (EEAA 1992).
- Most of the food, spinning/weaving and chemical industries are concentrated in the Alexandria metropolis. Industrial drainage in this region is has high organic and organic chemical loads representing about 34% and 48% respectively of the overall waste produced from industry. It was estimated that 21% of soluble substances, 13% of oils and lubricants and 8% of heavy metals of the total overall industrial wasteload are discharged yearly from this region to coastal waters.

Agricultural waste drainage

About 80% of the Nile water budget in Egypt ($55.5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$) is used for irrigation through the network of canals.

For a long time, Egypt was one of the major global consumers of agrochemicals because of the marked decrease in soil fertility due to the following two factors:

- The use of continuous irrigation in Egypt since the beginning of 19th century had created a suitable environment for increasing numbers of plant and crop enemies (insects, fungi, weeds) in the continuously humid soils.
- Since the construction of Aswan dam in 1968 the passage of highly fertile Nile mud to the Egyptian fields has been hindered.

The usage rate of agrochemicals has increased in parallel with the continual decrease of soil fertility.

River Nile-Mediterranean Sea connections in Egypt

The Nile delta is almost situated in the middle of the 995 km-long Egyptian Mediterranean coast (15.8% of the total Mediterranean coast length). It joins the Mediterranean Sea through its two branches surrounding the delta at Damietta in the east and at Rosetta in the west. The river is also connected to the sea indirectly through four coastal lakes, namely Manzala, Burullus, Mariut and Edku lakes. These lakes, especially Manzala and Mariut, could be considered as transitional sinks for the majority of Egypt's anthropogenic wastes. The budget of the pollutant cocktail in the lakes is expected to be exposed to significant alteration in quantity and quality before reaching the Mediterranean Sea.

Since the construction of the Aswan dam in 1968, the historically positive biological effects of the huge quantities of fertile Nile water ($40-50 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$) on the receiving Mediterranean coastal waters have become negative impacts. This impact is obvious in the decrease in nutrients in Nile waters ($2.5-4 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$), water productivity and in fisheries (UNEP 1990). There has also been rapid development in industrial activity, agrochemical usage and population size. These factors make the Nile water reaching the Mediterranean Sea rich in all sorts of anthropogenic pollutants. Moreover, the decrease in natural settleable suspended matters makes the journey of dissolved and minute solid wastes longer. However, the probability of reaching the Mediterranean coast has increased.

The coastal lagoons, which almost separate the Nile drainage area from the Mediterranean Sea, possibly play a significant role in limiting and modifying the pollutant levels in Nile water reaching the sea. In fact, these lagoons could be considered as the ultimate sinks for the major part of wastes in Nile water.

To estimate the overall impact of Nile water discharges in adding more of its constituents into the Mediterranean coastal waters, recent data were analysed. The data included the range of variation in concentrations of salinity (as chlorosity), dissolved organic matter (DOM) and nutrient salts (nitrate, nitrite, phosphate and silicate) in waters of the two main Nile branches (Damietta and Rosetta) and in the four coastal lagoons. From these data, the total annual inputs for each of the considered constituents into the Mediterranean receiving waters were estimated at different outlets. In general, the results indicate the significant contribution of discharged Nile water on the coastal water quality of the Egyptian Mediterranean environment especially in front of the Nile Delta (Awad and Hassan 1998).

Deterioration of the nearby marine environment in some areas, especially off the Alexandria metropolis, is a result of direct discharge of industrial pollutants and untreated domestic wastes into the coastal waters. The same conditions are dominant in the coastal zone off Lake Manzala. In fact the zone of the Mediterranean coastal waters off Alexandria is considered to be one of the hottest "hot spots" in the region (UNEP/MAP 1997).

Taking into account the above information (for more details see GOIF/FEF/EEAA 1991; EEAA 1992; SAAD 1997), the need for a monitoring mechanism near the River Nile mouth was recognised.

This mechanism, which could be either a permanent "Observatory" or a Monitoring and Enforcement Coordination Unit (MECU) is an urgent need, but will also be a useful tool for making decisions not only for the Alexandria metropolis but for the whole country and will benefit of the whole Mediterranean basin. It will serve as a data-bank for the dispersed environmental data and can overcome the current problem of lack of coordination and cooperation among the environmental authorities and institutions in Egypt.

The implementation of the proposed Nile-Mediterranean Observatory as MECU will be a practical tool for the success of the planned regional programmes aimed to develop local community capacities around the Mediterranean basin and to enforce the national and regional legislation. Indeed, the implementation of such a mechanism in association with other partners in the region will strengthen the cooperation between Mediterranean communities to protect, sustain, conserve and develop their irreplaceable natural heritage and environmental resources in at least a part of the Mediterranean basin.

References

- Awad, H. and Hassan, M. 1998 Pollution in coastal zone and areas affected by river discharge.: The Mediterranean coast of Egypt case study. Presented in workshop cooperation in the field of protection and restoration of coastal shelves and rivers of European countries CEREGE/CEEI, Aix en Provence, France, 16-18 November 1998.
- EEAA 1992 *Environmental action plan in Egypt*. Egyptian Environmental Affairs Agency, Cairo 1992, 169 pages.
- El-Gindy, K.S., Abd-Allah, A.A., Tantawy, G. and El-Sebae, A.H. 1991 Residue level of chlorinated hydrocarbon compounds in water and sediment samples from Nile branches in the Delta, Egypt. *J. Environ. Sci. Health B* **26 (1)**:15-36.
- El-Nabawi, A. Heinzel and Kruse, H. 1987 Residue levels of organochlorine chemicals and polychlorinated biphenyls in fish from the Alexandria region, Egypt. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* **16**:689-696.
- El-Sebae, A.H. 1994 Mediterranean pollution by pesticides and antifouling agents. In *Proceedings of the 1st Arab Conference on Marine Environment Protection, AMTA*, 5-7 Feb. 1994, 1-14.
- Ernst, W., Macklad, F. El-Seba, A.H. and Halim, Y. 1984 Monitoring of organochlorine compounds in some marine organisms from Alexandria Region *Proc. Int. Conf. Env. Haz. Agrochem.* vol **1**:95-108.
- GOIF, FEF and EEAA 1991 *Industrial environmental map, progress report*, Friedrich Foundation, Part 1, 37 pages.
- Saad, M.H. 1997 Inland Waters. Pages 28-45 in *Proceedings of Decision Makers Capacity Building Programme in Coastal Management Alexandria University/Euro-Arab Center/Netherlands Embassy in Cairo, 2-9 May 1997, Alexandria, Egypt*.
- UNEP/MAP 1997 *Identification of priority pollution hot spots and sensitive areas in the Mediterranean*. Draft Report.

4.5 Impact of dam construction on the sedimentary budget of the Sebou River (Morocco) and its estuarine zone

Souad Haida, Jean Luc Probst and Maria Snoussi

Abstract

A study on water and suspended sediment discharges exported by the Sebou River after dam construction shows the effects of the dams on the river downstream and on the estuary. The construction of large dams, supplemented by climatic fluctuations, has led to a sharp reduction of water inflow and sediment discharge. A maximum amount of sediment trapping (85-95% of the sediment load) occurred in the lakes of the reservoirs, which have a short useful life (42 to 910 years). Grain size studies have shown the extent to which the reservoir affects and controls the delivery process downstream. In the suspended sediment there is a considerable increase in the fine proportion, which can be released out of the dams during flood periods and comes also from erosion of river banks. The decrease in the sediment flux exported by the Sebou River after the construction of the dams led to a 97% reduction in the coarse fraction deposited in the estuary. An increase of the fine proportion and reduction of the fluvial component could increase siltation in the estuary.

Introduction

The importance of human impact on sediment load of a river is highly variable since it depends on the type of activity and its application to the catchment. In Morocco, the high degree of climatic variability, the torrential nature of storm runoff, the low vegetation cover, the intense lithological vulnerability and the deforestation induced an important increase in sediment supply up to ten times the average value observed during the Quaternary period (Heusch 1970).

In the Mediterranean climate, low rainfall and great fluctuations in its distribution constitute a severe limiting factor for economic development. Because of this situation, Morocco began in 1975 a vast dam construction programme aimed at irrigating 1×10^6 hectares before the year 2000 (DRPE, 1994) and producing some 5100 GWh yr⁻¹ of hydroelectricity. Currently, there are 84 large dams, whose total capacity exceeds 10×10^9 m³ supplying water of 772,000 ha of irrigated land. Reservoir sedimentation represents a serious problem for water supply management and for the morphological equilibrium of the coastline. The construction of dams and other sediment retention systems can reduce downstream suspended sediments by 80-98% (Duhamel, 1973). Other environmental effects of dam construction on the physical, chemical, and biological characteristics of disturbed rivers have been reported from most continents (Bishop and Bell 1978; Ward and Stanford 1979; King and Tyler 1982; Walker 1985; Davey *et al.* 1987; Barrow 1987; Xu 1996).

The main purpose of this paper is to define the important impact of the construction of dams on sediment discharge supply to the Sebou estuarine zone. In this study an effort has been made to quantify the water and the sediment discharge before and after the construction of dams and to examine their effects on the dynamics of the sediment in the coastal zone.

Physiographic basin and regulated river

The Sebou River is one of the largest Moroccan rivers, draining approximately 40,000 km² (Figure 1). It runs across some 600 km from its sources in the Middle Atlas to the Atlantic Ocean. The physiography of the watershed is strongly influenced by the altitude distribution between the north and the south. The Sebou basin can be divided into three distinct geomorphic regions: the upper, mid and lower Sebou. The upper Sebou rises to over 2,800 m in the Middle Atlas mountains and is underlain principally by calcareous rocks. Its mean annual precipitation is over 1,000 mm and its winters are snowy at higher elevations. The mid-Sebou basin is located in the Rif and the Pre-Rif Mountains, which are characterised by mid-altitudes averaging 2,000 m, very steep slopes, a strong rainfall gradient across the basin averaging 2,000 mm/year and a substratum consisting of schist, marl and marly sandstones. Among the major tributaries of the

Sebou draining the Rif and the Prerif Mountains, the Ouerrha and Inaouene are the predominant rivers in the basin. The lower Sebou enters the riverine plain and from there follows a highly sinuous course to the Atlantic Ocean. The estuarine system extends over 90 km of the lower Sebou, which has tidal influence.

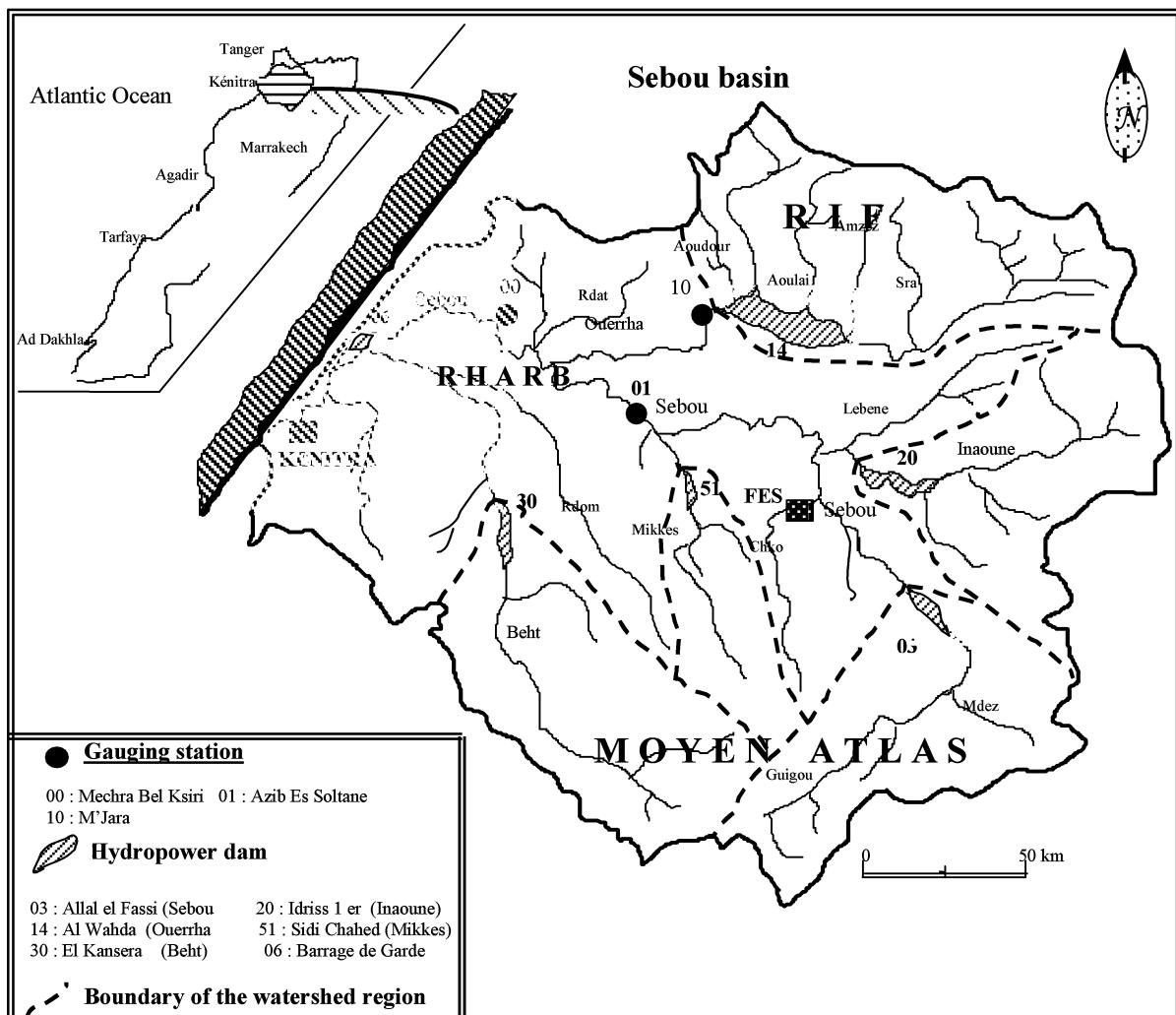


Figure 1. Geographic situation of the Sebou watershed showing major dams and gauging stations where data were collected.

In the Sebou basin, construction of dams began in 1935 with El Kansera reservoir on the Beht River. It was initially used for flood retention and later for water storage. By 1973 there were at least 15 dams in the Sebou basin, with five large reservoirs and 10 small dams. These reservoirs are now a major source of irrigation and drinking water and they strongly regulate the flow in the upper, middle and lower catchment. The Al Wahda dam constructed on the Ouertha River is the second most important dam in North Africa after the High Aswan dam. It was constructed between 1991 and 1996 with a storage capacity of 3.8×10^9 m³ for a height of 88 m. This reservoir will provide long-term storage, irrigate 100,000 ha, generate a hydroelectricity potential capacity of 400 GWh yr⁻¹, transfer a water capacity of 600×10^6 m³ towards the southern regions and protect the Gharb Plain from high floods.

Materials and methods

This study is based on data obtained from gauging stations operated by the Water Planning Research Directorate (DRPE). At each gauging station, DRPE measured water discharge rates and suspended sediment concentrations. Data from different stations provided estimates of the amount of sediment

trapped by the dams. The available data from DRPE (1970; 1973) and Duhamel (1973) are utilised for the calculation of the weighted mean water and sediment discharge rates before the construction of the dams. The present-day water and the sediment discharge rates of the Sebou River are calculated by a measurement and quantitative sampling program that have started since 1996 shortly before the Al Wahda dam was used for water storage. Suspended sediments were sampled to quantify the net change in the sediment discharge and the grain size composition after the construction of the dams.

Results and discussion

Water discharge before and after the construction of the dams

The mean annual water discharge for 1940 to 1973 (before the construction of the principal dams) of the downstream gauging station of the Sebou river (Mechra Bel Ksiri) and of the estuary zone were respectively about $5.1 \times 10^9 \text{ m}^3$ and $5.9 \times 10^9 \text{ m}^3$. During this period, the water discharge contribution of the upper Sebou and its affluents to the Sebou downstream was about $2.55 \times 10^9 \text{ m}^3$ (Figure 2). The construction of the Idriss 1^{er} dam on the Inaouene River reduced the inflowing water supply by 42%. In 1990 the Allal El Fassi dam constructed upstream on the Sebou River was put into service, reducing the downstream water discharge of the Sebou River by about 54%. Between 1973 and 1995, the Ouerha River carried most of the water discharge to the downstream of the Sebou. During maximum flood events the water discharge of the Ouerha River inundated large portions of the adjoining floodplain and caused considerable damage to people and property (DRPE, 1970; 1973). To protect the flood-prone territory, the Al Wahda dam was constructed to control the Ouerha River. As of 1996/97, the closure date of the Ouerha, the average annual flow carried by this river to the downstream was reduced by 45%.

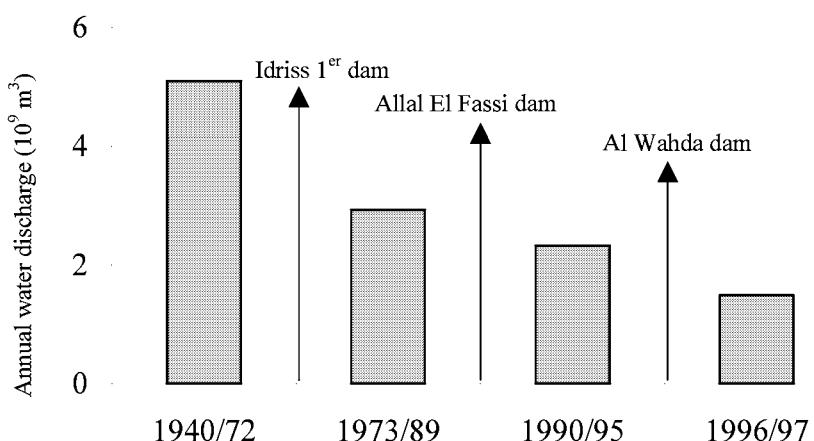


Figure 2. Variation of the annual water discharge at the downstream of the Sebou River before and after the construction of the dams.

Like all Mediterranean rivers, the Sebou River is subjected to climatic interannual irregularities. These have an important effect on the water discharge, particularly during dry periods when the reservoirs are used for water storage and very little of the inflow water is released. Figure 3 shows, in the Sebou, the relationship between the annual water discharge of the Sebou and the mean annual rainfall for a period of more than 32 years (1962-1994). The available data shows two opposite trends, before and after the construction of dams. In the Sebou the correlation between flow and precipitation is better before the dam construction (1962-1972) than after its construction (1973-1994). During this latter period the water discharge of the Sebou River has decreased independently of annual runoff. Possible reasons for this trend may be the effect of dams, the high evaporation intensity and the excessive use of water for irrigation during the drought period (Haida *et al.* 1999).

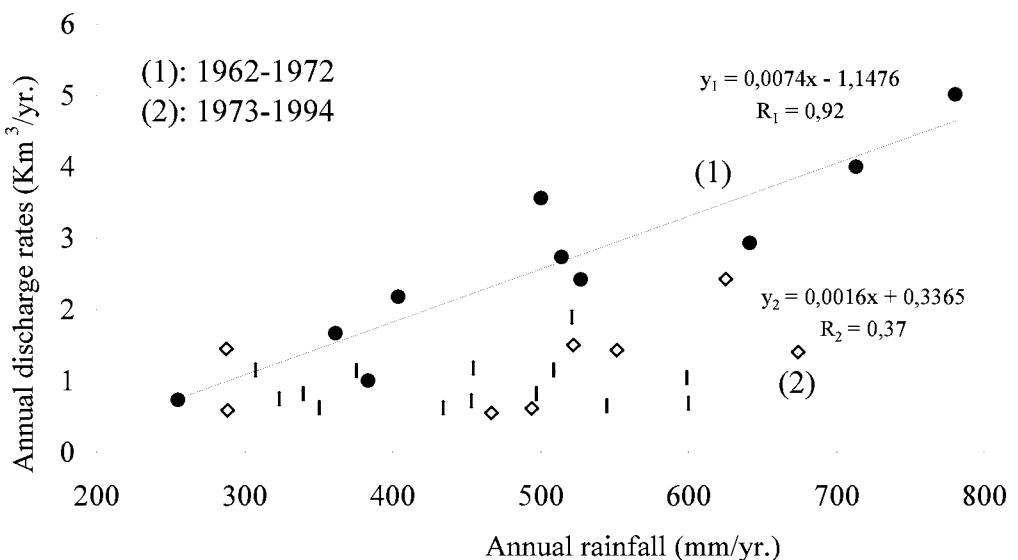


Figure 3. Relationship between the annual water discharge and the annual rainfall on the Sebou River at Azib Es Soltane during the two periods of 1962 to 1972 and 1973 to 1995 before and after dam constructions, respectively.

Suspended sediments discharge before and after the construction of the dams.

Before the construction of the dams on the main tributary of the Sebou River (1940-1972), the average suspended sediment input to the Atlantic Ocean was about 34×10^6 t yr⁻¹ (Figure 4). The estimated mean annual sediment yield in the Sebou basin is 850 t km⁻² yr⁻¹. This value is comparable to those of other Mediterranean areas (Tronto, Italy: 900 t km⁻² yr⁻¹ and Esino, Italy: 800 t km⁻² yr⁻¹; in Milliman and Syvitski 1992); Metauro, Italy: 870 t km⁻² yr⁻¹; IAHS/UNESCO 1974).

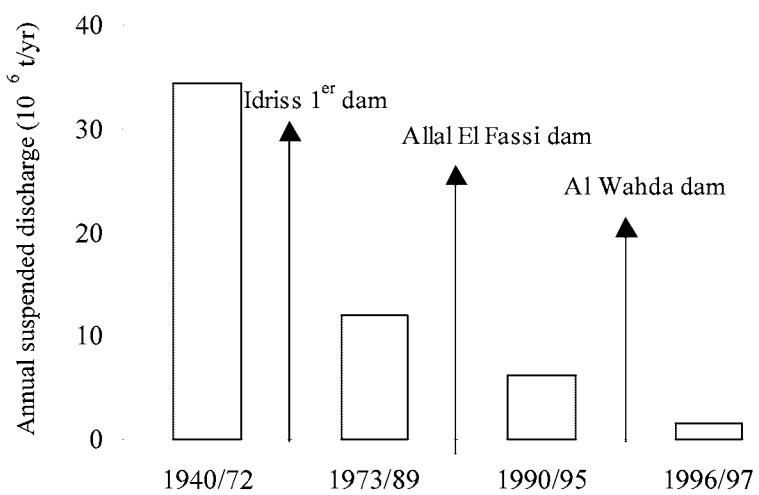


Figure 4. Variation of the suspended sediment discharge at the downstream of the Sebou River before and after the construction of the dams.

During this period 70% of the total material coming from erosion in the upper and middle reaches of the Sebou basin were carried to the Atlantic Ocean and 30% were deposited on the flood plain. With the construction of Idriss 1^{er} and Allal El Fassi dams (1973-1995), the downstream suspended sediment fluxes decreased to 12×10^6 t yr⁻¹ and 6×10^6 t yr⁻¹ respectively. Consequently, the suspended sediment supply by the Sebou River to the Atlantic Ocean was reduced about 73 % in comparison with the sediment flux measured before the construction of dams. In 1996, after the Al Wanda dam came into operation, the

sediment discharge measured downstream in the Sebou River has decreased to 1.6×10^6 t yr $^{-1}$ corresponding to a net reduction of water supply about 95%. This value is approximately similar to the trap efficiency value (from 85% to 99%) calculated by Haida *et al.* (submitted) and Haida (2000) for the dams constructed on the Sebou River and its affluents. Obviously, reservoir dams can intercept most of the sediment coming from the upstream River basin, and, thus, considerably reduce their storage capacity. According Haida *et al.* (submitted), their useful lifetime varies from 42 to 910 years. The short time that it takes for these reservoirs to be filled with sediment makes it necessary to consider sedimentation as a serious problem. In addition, reservoir sedimentation can have other serious implications on the evolution of the coastal plain. The river damming activities combined with the expansion of coastal towns, the development of beach tourism, sand extraction for construction purposes and the construction of ports, jetties and defensive structures have greatly altered the natural evolution of the coast (Snoussi *et al.* submitted).

Variation in grain size of the suspended and deposited sediments

During the pre-dam period, the size of the suspended sediment in the lower Sebou River showed the following proportions: 2% of sand, 52% of silt and 46% of clay (DRPE 1970) (Figure 5). After the construction of the dams, fine sediment was released through the dams preferentially over coarse sediment, so that the suspended sediment is dominated by the fine fraction (75% of clay) released out of the dams especially during the flood events; it also comes from bank erosion. Similar studies show that after the construction of dams, erosion rate increased (Colombani 1977) and the variation in the size composition of the sediment load depends on the delivery processes downstream (Xu 1996; Milhous 1997; Al Ansari and Rimani 1997).

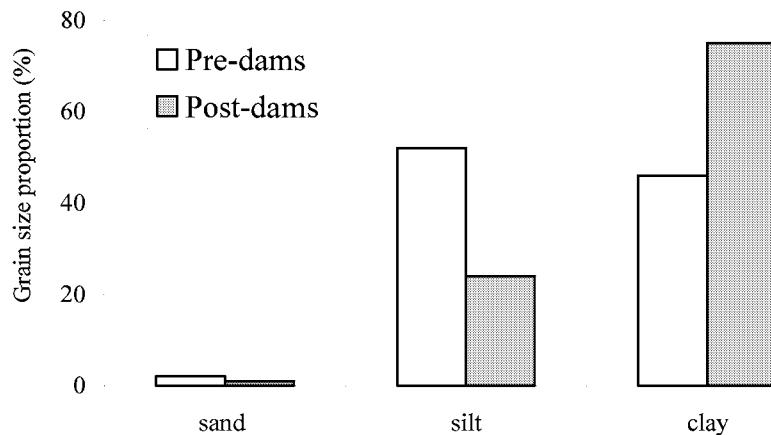


Figure 5. Grain size of the suspended load in the downstream of Sebou river before and after the construction of the dams.

Impact of the damming activities on the sedimentary dynami cs in the Sebou estuarine zone.

Before the construction of the dams on the upper and on the middle parts of the Sebou basin, the sediment fluxes carried by the Sebou River to the Atlantic Ocean were mainly composed of fine elements. The proportion of the sand deposited in the estuary was approximately 2%. Thus, we can calculate the amount of sediments deposited in the estuarine system using the proportions of the sand and the fluvial suspended fluxes. The annual deposited sediments in this system is about 680 000 t/yr. According to DRPE (1970), dredging is an efficient means to keep a draught of 4.5 m for navigation purposes. During the period 1954 to 1967 the dredging has varied from 1,920,000 t yr $^{-1}$ to 660,000 t yr $^{-1}$. Other installations are planned for this estuary system. Defensive structures have been constructed on many parts of the banks to keep back fluvial sediments and to create a navigable channel with a strong current.

After the construction of the Idriss 1^{er}, Allal El Fassi and Al Wahda dams (1973-1996), the sediment fluxes supplied by the Sebou River estuary was reduced about 95%. Suspended sediments are still dominated by

the fine fraction. However, the clay fraction increased after the construction of the dams. The annual mean deposited sediment in the estuarine zone is about 16,000 t yr⁻¹, which is 43 times less than before the construction of the dams.

Conclusion

The variations observed in the water and the sediment discharges after the construction of the dams reflect their effects on the physical characteristics of the Sebou basin and the estuarine zone.

Downstream, the water discharge of the Sebou River and its affluents was reduced after the construction of the dams by about 70%. More than 95% of the total sediment load had been trapped by all the reservoirs. Consequently the sediments will quickly fill these reservoirs and cause considerable losses of their capacity. After the construction of the dams, the suspended sediment grain size exhibits a high proportion of fine sediments (75%). This fining tendency is induced by the combination of fine sediment release from the dams especially during the flood events and by bank erosion, which intensified after dam construction. Damming has also affected the amount of suspended sediment supplied to the estuarine zone. Thus, the decrease in sediment flux exported by the Sebou River after the construction of the dams led to a decline in the sand fraction deposited in the estuarine system. With the decrease of the fluvial competence, the Sebou River estuary will become more heavily silted and the defensive structures could induce important modifications in the natural evolution of the coast.

The results of this study are preliminary; more detailed measurements of suspended sediment discharge and reservoir siltation are required to provide a definitive assessment of reservoir sedimentation problems and their effects on the river downstream and the estuary system.

References

- Al-Ansari, N. and Rimani, O. 1997 The influence of the Mosul dam on the bed sediments and morphology of the River Tigris. *Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997), LAHS*, **245**: 291-300.
- Barrow, J.C. 1987 The environmental impacts of the Tucuri dam on the middle and lower Tocantins river basin, Brazil. *Regulated Rivers* **1**: 49-60.
- Bishop, K.A. and Bell, J.D. 1978 Observations on the fish fauna below Tallowa Dam (Shoalhaven River, N.S.W) during river flow stoppage. *Aust. J. Mar. Freshwat. Res.* **29** (4): 543-549.
- Colombani, J. 1977 Effets sur les transports solides des ouvrages hydrauliques en Afrique du Nord. Symposium. In: *Erosion and solid matter transport in Inland waters, LAHS*, **122**: 295-300.
- Davey, G.W., Doeg, T.J. and Blyth, J.D. 1987 Changes in benthic sediment in the Thomson River, southeastern Australia, During construction of Thomson Dam. *Regulated Rivers*, **1**, 71-84.
- DRPE. 1970- Projet Sebou. Rapport général. Développement régional du Sebou. *L'érosion*, **10**, 1-55
- DRPE. 1973- Etude des mesures de protection contre les inondations. *Rapport de fin de mission 1, II (2d) sédimentologie, agronomie et sociologie*.
- DRPE 1994 Les grands barrages du Maroc. Publication de l'administration de l'hydraulique, *80p*.
- Duhamel, P.L. 1973 Transport solide et sédimentation dans le bassin du Sebou. *Rev. de Géogr. Maroc* **15**: 289-369.
- Haida, S., Probst J.L., and Snoussi, M. (submitted)- Impact of the construction of dams on the water and the sediment discharge in the semi-arid basin: The Sebou (Morocco). *Regulated rivers*.
- Haida, S., Probst, J.L., Aitfora, A. et Snoussi, M. 1999 Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant du Sebou entre 1940 et 1994. *Rev. Sécheresse*. n° **3**, vol. **10**: 221-228.
- Haida, S. 2000 Transport de matières et bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique dans un bassin versant de zone semi-aride: Le Sebou. Impacts des variations climatiques et des activités humaines. *Thèse Doct. Etat., Univ. Ibn Tofail, Kénitra, Maroc*, 253 pages.
- Heusch, B. 1970 L'érosion hydraulique du Maroc: Son calcul et son contrôle. *Al Awamia* **36**: 39-63.
- IAHS/UNESCO 1974 Cross sediment transport into the oceans, preliminary edition. *UNESCO SC. 4/WS/33*, 4 pages.

- Milliman J.D. and Syvitski J.P. 1992 Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers, *J. Geol.* **100**: 525-544.
- King, R.D. and Tyler, P.A. 1982 Water chemistry on the Gordon River basin. *Lower Gordon River Scientific Survey*. HydroElectric Commission, Hobart, Tasmania.
- Milhous, R.T. 1997 Reservoir construction, river sedimentation and tributary sediment size. *Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997)*, **245**: 275-290.
- Snoussi, M., Haida, S. and Imatti (submitted) Coastal changes in response to the effects of dam construction on the Moulouya and the Sebou rivers. *Environmental Change*.
- Walker, K.F. 1985 A review of the ecological effects of river regulation in Australia. *Hydrobiologia* **125**: 111-129.
- Ward, J.V. and Stanford, J.A. 1979 *The Ecology of Regulated Streams*. Plenum Press, New York.
- Xu, J. 1996 Complex behaviour of suspended sediment grain size downstream from a reservoir: An example from the Hanjiang River. *China. Hydrol. Sci. Journal, Oxford U.K.*, **41** (6):837-849.

4.6 Behavior of heavy metals from land to coastal zone through estuaries: Moroccan case studies

Maria Snoussi

Abstract

Base-line studies have been carried out on the trace metal contents of bottom sediments of three Moroccan estuaries and their catchment drainage, representing both contaminated and relatively uncontaminated environments. The levels of trace metal (lead, copper, zinc, nickel) concentrations when normalized against aluminium concentration indicated contamination with one or more of the elements at most of the estuarine and marine stations.

In the Sebou River, the enrichment of estuarine sediments in comparison to the background levels is attributed to land-based point sources of pollution located along the river and estuarine banks. It is likely that the Sebou River estuary acts as a trap for heavy metals. In the estuaries of the Tensift and Souss rivers, the estuarine sediments are low in heavy metals. This could mean that these systems facilitate the release of heavy metals from sediments and hence regulate their fluxes to the ocean. On the other hand, the enrichment of some metals in the marine sediments is attributed to mixing with contaminated sediments which have come from polluted areas and ports (Safi, Agadir) and have been transported southward by the littoral drift.

Introduction

Rivers are the major routes from the land to the sea of the natural products of weathering and of many man-made materials. Economic activities and household consumption generate significant pollutants into rivers and coastal zones. Among them, non-biodegradable heavy metals have great ecological impact due to their toxicity and accumulation. Before entering the ocean, heavy metals must pass through estuaries which are interfaces of high biological productivity. Major cities and harbors are often located in estuaries, thus further disturbing natural conditions.

Much of the anthropogenic heavy metals discharged into the estuaries becomes suspended in rivers. The estuarine distributions of trace metals can be interpreted in terms of geochemical processes such as flocculation, precipitation, adsorption/desorption, and also in terms of mixing processes and biological cycling (see Martin *et al.* 1976; Salomons and Förstner 1984; Jouanneau *et al.* 1983).

In the hydrological cycle that governs the fate of metallic elements, sediments play an essential role to the extent that they are increasingly recognized as vectors, principal sinks and potential sources of a great number of toxic metals. Thus, sediment analysis is an important tool to trace man-caused pollution of water (Förstner and Wittman 1983; Senten and Charlier 1991).

This paper aims to describe the general behaviour of lead, zinc, copper and nickel from the soils to the adjacent coastal zones of three river basins, representing contaminated and relatively uncontaminated environments, to determine whether the estuarine sediments act as traps or sources of trace metals.

Study areas

Three rivers were selected for this study: the Sebou, the Tensift and the Souss. (Figure 1).

Detailed accounts of the physical setting of their drainage basins have been given in previous works (Snoussi 1988; Sahibi and Snoussi 1993; El Mouden and Snoussi 1994; Snoussi *et al.* 1992; Haïda *et al.* 1996; Haida 2000). In summary:

- The Sebou River, whose drainage basin covers an area of 40,000 km² represents one of the most populated, agricultural and industrial regions of Morocco. The lower reaches and estuarine zone of the Sebou flow through the city and harbour of Kenitra and have been impaired by the discharge of untreated sewage and industrial effluents. Tidal influence reaches the Garde dam (85 km), which was installed to restrict the salt wedge intrusion upstream.

- The Tensift River, with 19,850 km² of drainage area, runs through the large agricultural plain of Haouz and the metropolitan area of Marrakech. Except during rainy winters, the river flow of the mid-Tensift is dominated by domestic effluents. However, the flow is too weak to reach the sea, and the estuarine zone (5 km) is relatively unpolluted.
 - The Souss River is a characteristic arid zone temporary river, draining an area of 16,100km². It is often dry in its lower reaches. The 5 km long estuarine zone traverses some small urban agglomerations. To the north of the estuary, the city and the big port of Agadir provide potential sources of both urban and industrial contamination.

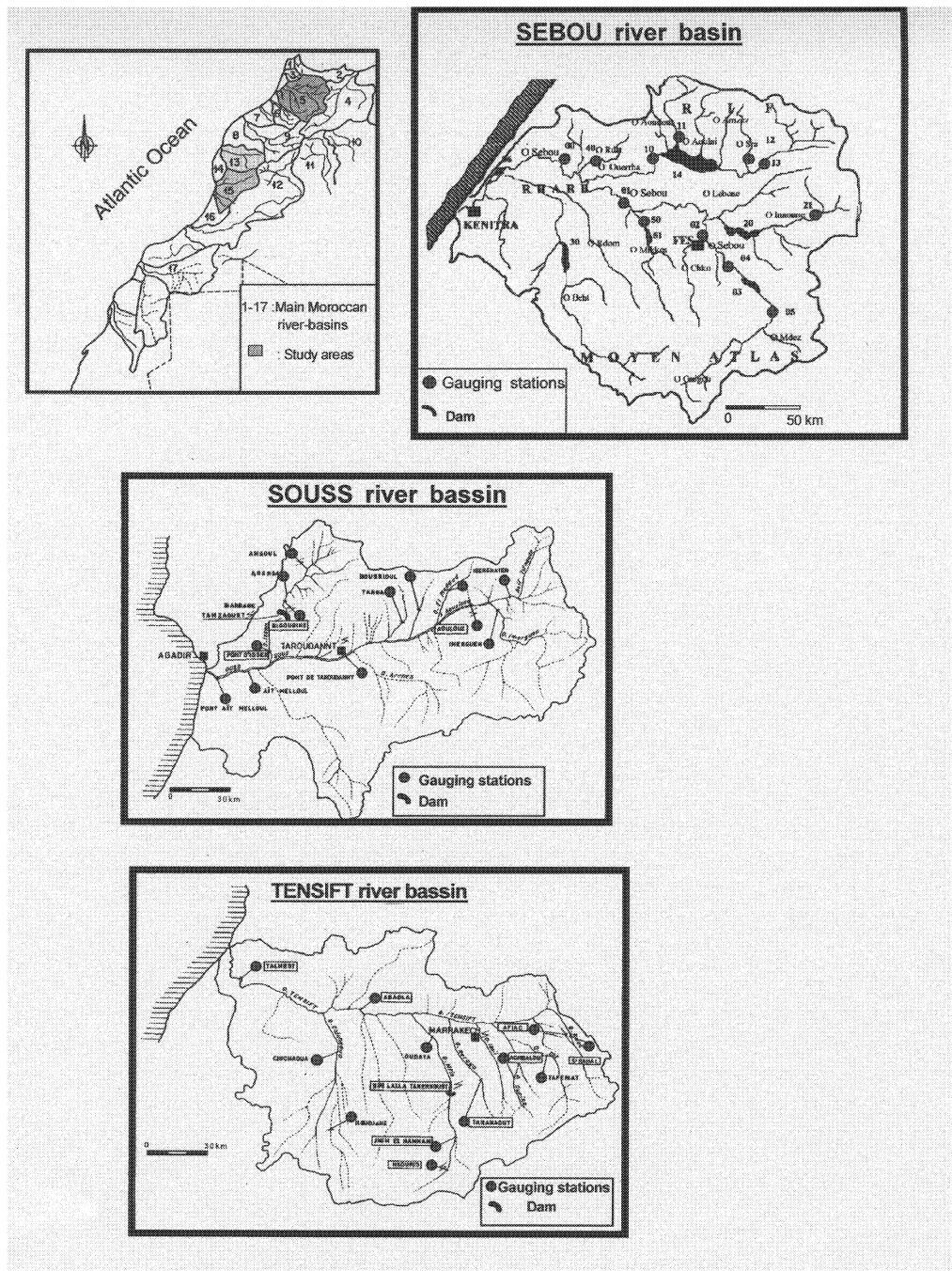


Figure 1. The basins of the Sebou, Souss and Tensift rivers, Morocco.

Materials and methods

A total of 45 samples of surficial sediments were collected from the Sebou, Tensift and Souss river basins and their adjacent coastal areas.

- Freshly deposited bed sediment samples were collected along the river bank, upstream of the limit of the tidal influence.
- In the estuarine section, samples were taken during low tides, from the limit of the tidal influence to the mouths of the rivers.
- Surficial marine sediment samples were collected at a series of offshore stations opposite the mouths of the rivers by a Schipeck grab from the French R/V *Noroit* during the Geomar cruise.
- Soil samples were taken in non-polluted locations within the river basins to establish the natural background levels for the rivers, in order to define the extent of potential pollution. Chemical analysis for Al, Cu, Ni, Pb and Zn was performed by the energy-dispersive X-ray fluorescence technique (XRF) on the bulk samples.

Results and discussion

The mean concentrations of trace metals in the soils and the sediments of the Sebou, Tensift and Souss river basins are given in Table 1.

Table1 : Mean concentrations of trace metals in soils, fluvial, estuarine and marine sediments in the studied areas.

	Average contents	Al ₂ O ₃ %	Zn ìg/g	Ni ìg/g	Pb ìg/g	Cu ìg/g
Sebou	Soils	11.7	103	42	23	78
	Fluvial sediments	10	85	35	20	73
	Estuarine sediments	12	111	42	35	78
	Marine Sediments	14	93	42	29	65
Tensift	Soils	11.6	83	5	37	29
	Fluvial sediments	15.4	129	54	35	36
	Estuarine sediments	13	96	42	27	22
	Marine sediments	10	125	30	24	28
Souss	Soils	12.7	55	30	11	63
	Fluvial sed.	14	70	34	15	71
	Estuarine sediments	9.8	59	29	11	57
	Marine Sed.	10	70	27	12	61

To provide a meaningful comparison between different results, as well as an assessment of the local anthropogenic contribution to the sediments, elemental concentrations were normalized with respect to a conservative element : aluminium was chosen in this study.

The average contents of heavy metals normalized to Al in fluvial, estuarine and marine sediments were compared to the natural geochemical background.

It appears that:

- in the Sebou River basin (Figure 2), average metallic contents are highest in the estuarine stations. This enrichment is attributed to contamination derived from both industrial and domestic effluents discharged directly into the estuary. The most probable source of Pb contamination is particles related to traffic (petrol combustion) along the estuary's banks. It is also likely that in the estuarine zone, the metals in solution could precipitate with iron-hydroxyde, which is known to act as an effective scavenger for a number of heavy metals (Goldberg 1954), depleting the water and enriching the

sediment in heavy metals (Boyle *et al.* 1977; Sholkovitz 1978). Indeed, sediments derived from the Sebou lower estuary are enriched in iron oxides.

- In the Tensift River basin (Figure 2), normalized metallic contents are weaker in estuarine sediments than in fluvial ones. This phenomenon, common in many estuaries, can be attributed to the mobilization of metals caused by the formation of complexes between the metal ion sorbed to the sediments and organic ligands released by the intensive decomposition of organic matter (Bourg, 1983; Jouanneau *et al.* 1983). On the other hand, marine sediments are almost twice as rich in Zn than the background level and estuarine sediments. This enrichment is probably due to the transport of marine contaminated sediments brought by littoral drift from the industrial zone of Safi and mixing with impoverished estuarine deposits.
- In the Souss River (Figure 2), normalized data showed a seaward increase of Zn and Cu contents. This could be explained, as in the case of the Tensift, by a contamination coming from the sea and the port of Agadir. The analysis of some sediments sampled in untreated sewage discharged in the estuary showed that despite the strong metals contents of this urban effluent, estuarine sediments downstream of the discharge are not contaminated (Figure 3). This can be explained by the fact that the exclusively organic nature of this sewage entails the release of metals linked to the organic components. This would favor their evacuation at sea in the dissolved form.

To facilitate metallic content comparisons, "mobility factors" (M1 and M2) that represent ratios of normalized contents between marine sediments and soils on the one hand and between estuarine and marine sediments on the other hand were used (Figure 4) . These trends agreed with previous interpretations, namely:

- sediments of the Sebou are polluted by industrial and urban effluents discharged directly in the river and the estuary, while marine sediments are not contaminated. The Sebou estuary acts as sediment trap which apparently retains a large percentage of the particulate metals entering from rivers. This phenomenon is exacerbated by the progressive siltation of the estuary following the construction of many dams on the Sebou River (Haida 2000).
- estuaries of the Tensift and the Souss play the role of "releaser" for some metals, that are impoverished in sediments, while the pollution comes from the sea.

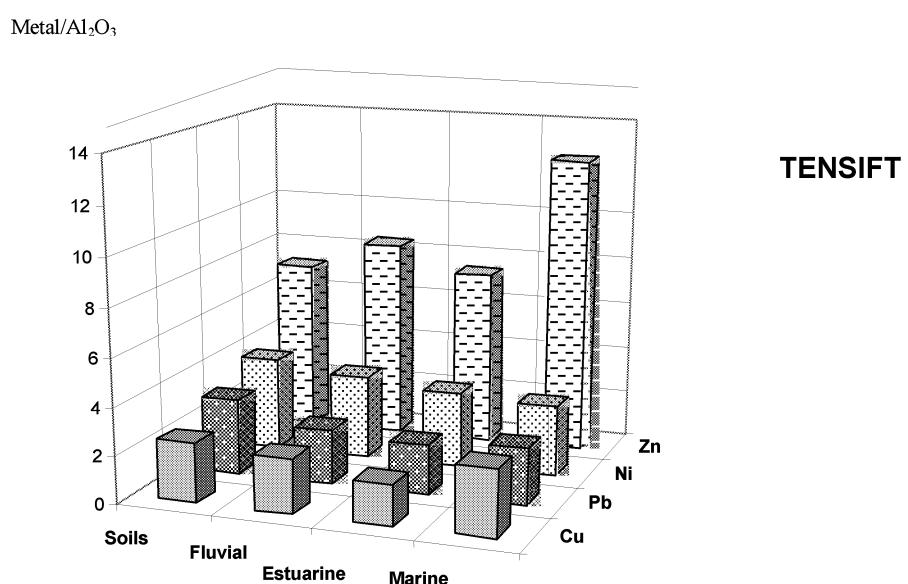
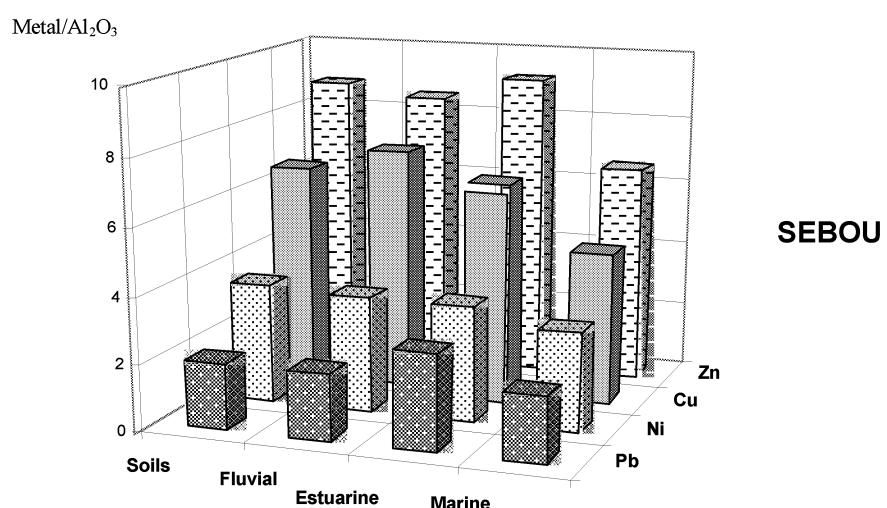
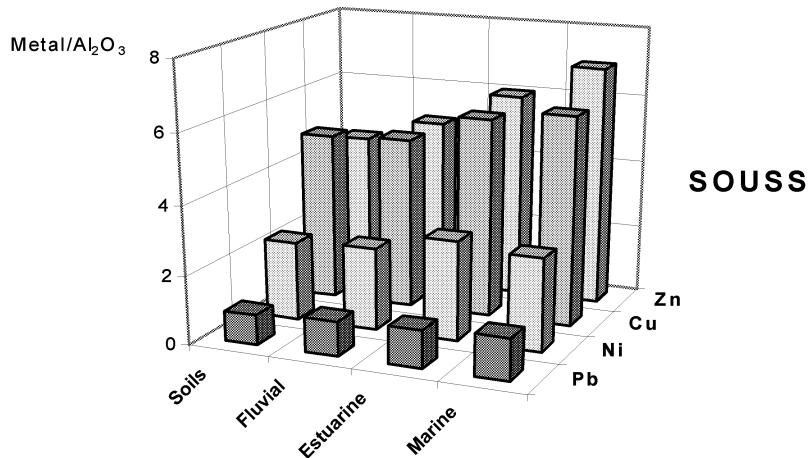


Figure 2. Comparison of the metal / Al_2O_3 ratio between soils and riverine, estuarine and marine sediments, in the Sebou, Tensift and Souss basins.

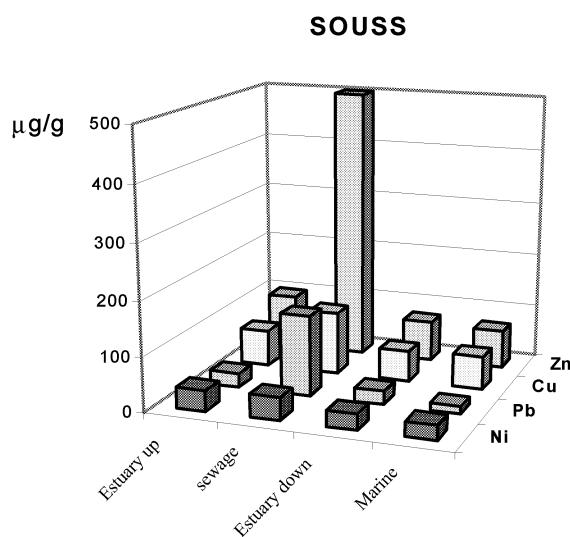


Figure 3. Average contents of metals in the Souss estuarine sediments upstream and downstream an urban effluent.

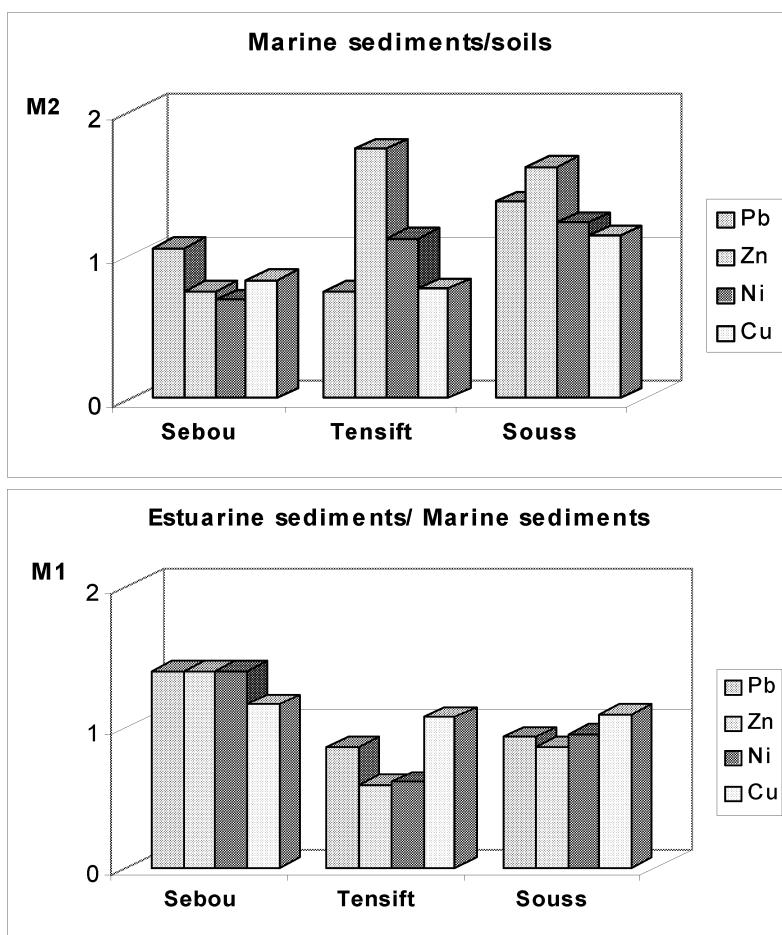


Figure 4. 'Mobility Factors': M1:metal/ Al_2O_3 in marine sediments Metal/ Al_2O_3 in soils and M2: metal/ Al_2O_3 in estuarine sediments_metal/ Al_2O_3 in marine sediments.

Conclusion

As environmental pollution has increased, sediment analysis has gained in importance because pollutants, such as heavy metals, are enriched in bottom deposits. By trapping metals, sediments act as reservoirs of potentially remobilizable metals and then represent risks for ecosystems.

In estuaries, as well as the control by hydrodynamic processes outside the scope of this study, the behavior of metallic elements is governed by chemical reactions that lead to the release or the trapping of trace metals. These processes regulate the fluxes of particulate and dissolved metals to the ocean. Estuaries can be seen as barriers preventing a large portion of river-borne solutes from entering and accumulating in the world's oceans. However, it is important to better understand estuarine processes to predict the geochemical behavior of each element as well as the role of these processes in the mass balance between rivers and oceans.

Chemical and hydrodynamic processes in Moroccan estuaries are still poorly understood. To get a better idea of these very complex mechanisms, it is necessary for further work to analyse metals and organic matter in waters and suspended particles.

References

- Bourg, A. 1983 Modélisation du comportement des métaux-traces à l'interface solide-liquide. *PhD. Univ. Bordeaux I, n° 689*, 258 pages.
- Boyle, A.E., Edmond, J.M. and Sholkovitz, E.R. 1977 The mechanism of iron removal in estuaries. *Geochemica et Cosmochimica Acta* **41**:1313-1324.
- El Mouden, A. and Snoussi, M. 1994 Pollution métallique dans l'estuaire du Souss (Maroc). *Colloque International "Eau et Pollution", Agadir, 21-23 avril 1993*.
- Goldberg, E.D. 1954 Marine geochemistry. I. Chemical scavengers of the sea. *J. Geol.* **62**:249-265.
- Haida, S., Snoussi, M., Latouche, C. et Probst, J.L. 1996 Géodynamique actuelle dans le bassin de l'Oued Tensift (Maroc): Erosion mécanique et bilan des Transports solides fluviaux. *Sci. Géol. Bull.* **49(1-4)**: 7-23.
- Haï da, S. 2000 Transports de matières et bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique dans un bassin versant de zone semi-aride: le Sebou. Impact des variations climatiques et des activités humaines. *Thesis PhD, Univ. Ibn Tofail, Kénitra*.
- Jouanneau, J.M, Etcheber, H. and Latouche, C. 1983 Impoverishment and decrease of metallic elements associated with suspended matter in the Gironde estuary. In *Trace metals in sea water*, Plenum Pub. Corp., pages 245-263.
- Martin, J.M., Meybeck, M., Salvadori, F. and Thomas, A. 1976 Pollution chimique des estuaires: Etat actuel des connaissances. *Publ. CNEXO, Série Rapp. Scient. et techn. n° 22*.
- Sahibi, A. and Snoussi, M. 1993 Dynamique sédimentaire actuelle d'un estuaire situé en zone semi-aride: le Tensift. *14th Regional Meeting of Sedimentology, Marrakech, April 27-29 1993*.
- Salomons, W. and Förstner, U. 1984 *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag, 332 pages.
- Senten, J.R. and Charlier, R.H. 1991 Heavy metals sediments pollution in estuarine and coastal waters: corrective measures for existing problems. *International Journal of Environmental Studies* **37**:79-96.
- Sholkovitz, E.R. (1978): The flocculation of dissolved Fe, Mn, Al, Cu, Co, and Cd during estuarine mixing. *Earth Planetary Science Letters* **41**: 77-86.
- Snoussi, M. 1984 Comportement de Pb, Zn, Ni et Cu dans les sédiments de l'estuaire du Loukkos et du proche plateau continental (Côte atlantique marocaine). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux* **46**:119-126.
- Snoussi, M. 1988 Nature, estimation et comparaison des flux de matières issus des bassins versants de l'Adour (France), du Sebou, de l'Oum-er-Ria et du Souss (Maroc). Impact du climat sur les apports fluviatiles à l'Océan. *Mémoires de l'I.G.B.A., Bordeaux n° 20*, 409 pages.
- Snoussi, M. 1992 Modalités de transfert des métaux à l'interface continent-océan. Quelques exemples. *Hydroécologie Appliquée, Tome 4, vol. 2*: 215-226.
- Snoussi, M., Jouanneau, J.M. and Latouche, C. 1990 Flux de matières issus des bassins versants des zones semi-arides (bassin du Sebou et du Souss, Maroc). Importance sur le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'Océan mondial. *Journal of African Earth Sciences* **11 (1)**:45 55.

4.7 Coastal changes in response to the effects of dam construction on the Moulouya and the Sebou rivers (Morocco)

Maria Snoussi and Souad Haïda

Abstract

Sediment fluxes of the Moulouya and Sebou rivers - the two largest rivers of Morocco - were estimated on the basis of suspended sediment loads transported by these rivers towards the coast. It appears that the specific sediment yields of the Sebou (995 t/km²/yr) and the Moulouya (240 t/km²/an) are among the highest in Africa, due to the fact that the drainage basins are characterized by young, mountainous, extended erodible sedimentary rocks, irregular and often stormy precipitation and scarce vegetation.

In recent times these sediment loads and water discharges have been drastically reduced as result of dam construction and changes in rainfall regimes. It is estimated that the construction of dams has reduced the water discharge of the Sebou and the Moulouya rivers by 70% and 47%, and their sediment fluxes by nearly 95% and 94%, respectively.

Damming of rivers appears to have had a profound effect on the coastal zones, which react by achieving a new sedimentary equilibrium. The forcing induced by the estuarine behavior of the lower stretches of both rivers downstream of the dams has greatly disturbed the mouth topography and coastal stability.

Key-words: Sediment yield - Moroccan rivers – dams – siltation - coastal morphology.

Introduction

River sediment fluxes constitute one of the main components of the coastal sedimentary budget. Any change of these fluxes may significantly alter the physical environment of the coastal systems (Hay, 1994; Simeoni and Bondesan 1997; Poulos and Chronis 1997; Barusseau *et al.* 1998).

As a semi-arid region, Morocco faces periodic rainfall deficit due to recurrent droughts. In order to better manage these shortages, a large-scale program of dam construction has been carried out over the last decades for drinking water, irrigation and hydroelectric power (DRPE, 1994). However, these reservoirs suffered from siltation due to the high rate of natural and accelerated erosion of the hinterlands. According to Lahlou (1996), the annual sedimentation rates in Moroccan reservoirs reached 50×10^6 m³/yr. This huge siltation has a serious environmental and socio-economical impact, since it reduces the reservoir capacity and may affect the morphological equilibrium of the coastline.

This paper provides data on the water and sediment fluxes of the two largest rivers in Morocco: the Moulouya and the Sebou rivers that flow respectively into the Mediterranean Sea and the Atlantic Ocean. The main objectives are to investigate the role of one component of the coastal sedimentary budget, the trapping of river sediment within reservoirs, and to examine the geomorphological response of the coastline to the human activity of building dams.

The river systems (Figure 1)

Moulouya River

The Moulouya River is the largest river in Morocco, draining approximately 53,500 km² of eastern Morocco. It rises in the Atlas Mountains and flows into the Mediterranean Sea. The basin is characterized by heterogeneous topography and lithology, and by arid and semi-arid climatic conditions, with predominantly seasonal streams. Annual precipitation ranges from 200 mm to 600 mm and occurs in only a few days. The upper region, mountainous and hilly, is separated from the lower floodplain by the large Mohammed V reservoir which traps most of the sediment delivered from the upper basin.

Sebou River

The Sebou River covers a total drainage area of approximately 40,000 km². It runs through about 600 km from its sources in the Middle Atlas Mountains to the Atlantic Ocean. Two mountainous chains surround

the drainage basin: the Rif Range to the north, drained mainly by the Ouerrha River, which has a torrential regime during flood periods; and, to the south, the Middle Atlas and the Plateau Central, drained by the Sebou and other tributaries whose regimes are more regular and are fed by the snowmelt. The climate is sub-humid to semi-arid. The mean annual precipitation ranges from less than 500 mm in the Rharb Plain to more than 2000 mm in the Rif Mountains.

The Sebou River basin is one of the most populated regions of Morocco. In 1990, its population was about 5 million of which 61% lives in rural zones. It represents the most important agricultural region of the country and has a relatively developed social and economic infrastructure. The basin encompasses seven large reservoirs and at least ten small ones built over a period of 70 years.

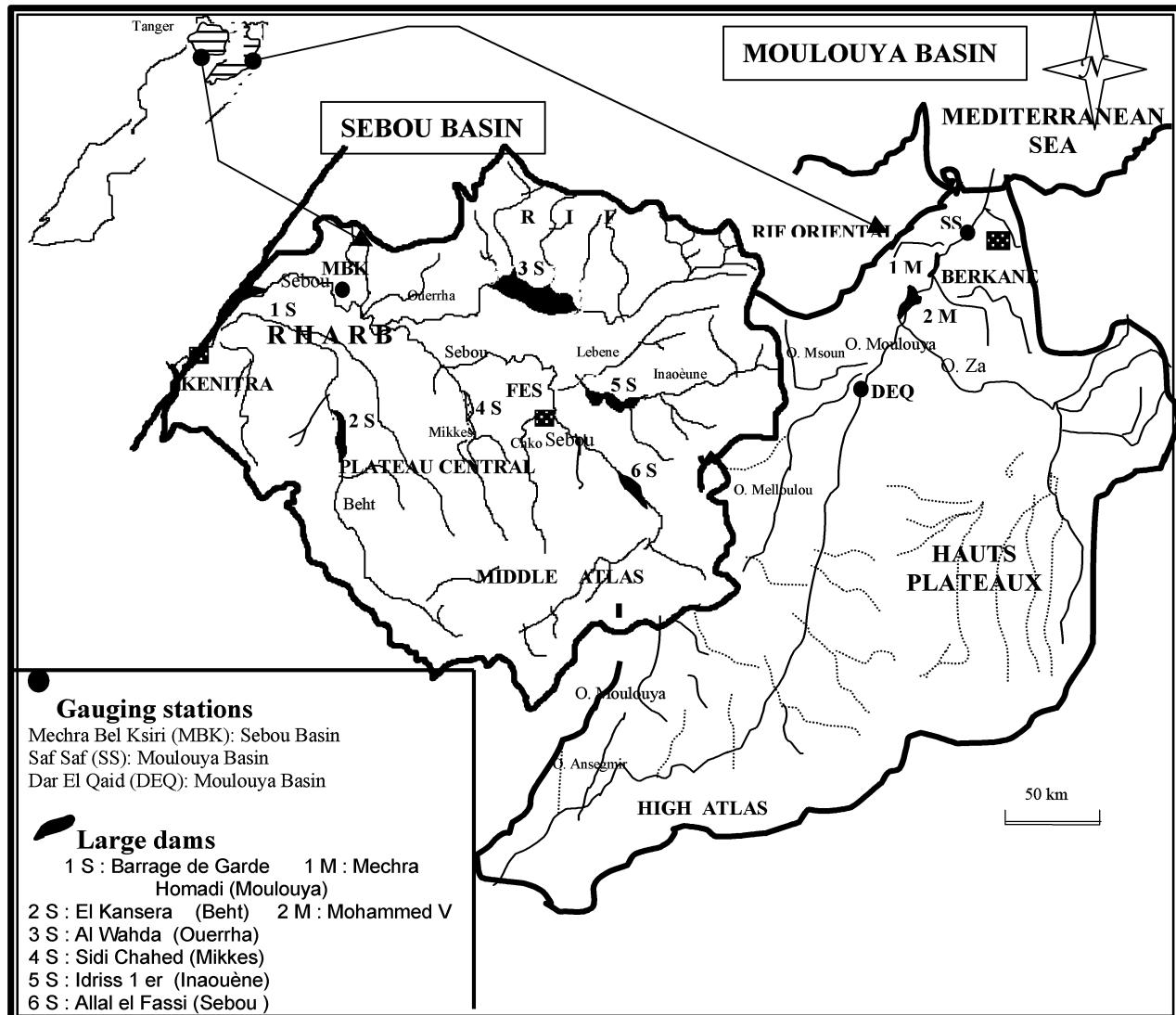


Figure 1. Geographic situation of the Sebou and the Moulouya watersheds showing major dams and gauging stations where data were collected.

Data and results

Data on water flows and suspended sediment concentrations used in this study were obtained from four gauging stations operated by the Water Planning and Research Directorate (DRPE) who provided the information on the status of dams.

Water and sediment fluxes

Impact of dams on water fluxes

Table 1 presents for each river, the drainage basin area, the river runoff and the mean annual water discharge at the furthest downstream flow gauging stations: Mechra Bel Ksiri (MBK) for the Sebou and Saf Saf for the Moulouya.

Table 1. Drainage basin area, mean annual water discharges and specific water flow at the downstream gauging stations on the Moulouya (Saf Saf) and the Sebou rivers (Mechra Bel Ksiri).

	Gauged drainage basin		Period of data collection	Mean annual discharge ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Mean annual flow 10^6 m^3	Annual runoff (mm)
	(km^2)	(%)				
Moulouya (Saf Saf)	49 920	93	1970-1996	13	410	8.2
Sebou (Mechra Bel Ksiri)	26 100	65	1940-1994	131	4 127	158

As outlined above, the Sebou River system is heavily regulated and the flow regime has been significantly altered. Haida *et al.* (submitted) estimated the water discharges before and after dam construction and concluded that dams have reduced water discharge to the coast by approximately 70%. In the Moulouya River, water discharge has been reduced by about 47% due to the construction of the Mohamed V reservoir.

Impact of dams on sediment fluxes:

Available data on suspended sediment in the Sebou basin are relatively comprehensive and cover a long period, whereas they are far more fragmentary and discontinuous for the Moulouya River. The annual suspended sediment discharge and yield are presented, together with corresponding water discharges in Table 2.

As can be seen from this table, the Sebou River has a mean specific suspended sediment yield four times higher than that of the Moulouya River. This value is also higher than that estimated by Snoussi *et al.* (1990) for the Moroccan Atlantic rivers ($750 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) and by Probst and Amiotte-Suchet (1992) for the whole Maghreb region ($610 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$). This exceptionally high sediment yield of the Sebou River is due to the combination of the steeper slopes that often generate mass movements, such as landslides and mudflows (Heusch and Milliès-Lacroix 1971), the extended, easily erodible sedimentary rocks of its drainage area (Haida 2000), the high precipitation rates and human activities such as vegetation clearance and land-use change.

The Sebou River basin provides an interesting case study for examining the effects of reservoir construction on river sediment fluxes. Haida *et al.* (submitted), have estimated the mean suspended sediment flux prior to dam building (1940-1972) at about $34.3 \times 10^6 \text{ t yr}^{-1}$ at the Mechra Bel Ksiri gauging station. After the construction of different dams on the rivers, the sediment yield was not more than $1.63 \times 10^6 \text{ t yr}^{-1}$. Thus, more than 95% of the total sediment load had been trapped. Haida (2000) reported that for the Sebou and its tributaries, the mean trapping efficiency of dams ranges from 85 to 99%, and the lifespan of the dams ranges from 42 to 910 years.

For the Moulouya River, the construction of the large Mohammed V reservoir, combined with more frequent droughts since 1980, has led to a drastic reduction in sediment supply to the coast. Prior to dam construction, the Moulouya transported an average sediment load of $12 \times 10^6 \text{ t yr}^{-1}$ to the coast. Unfortunately, no suspended sediment data for below the dam are available. However, assuming a 94% calculated trap efficiency of sediment by the dam, it can be estimated that the Moulouya River delivers nowadays to the Mediterranean Sea only 6% of the load transported before dam construction. Its lifespan is estimated at about 85 years.

Table 2. Mean annual water and suspended sediment fluxes in the Sebou and in the Moulouya drainage basins.

River	Gauging station	Area (km ²)	Period of data	Mean annual water discharge 10 ⁶ m ³	Mean annual suspended sediment load & yield	
					10 ⁶ t yr ⁻¹	t km ⁻² /yr ⁻¹
Sebou	Mechra Bel Ksiri	26,100	1940-94	4 127	26	995*
Moulouya	Dar El Qaid	24 422	1950-88	700	7	287*
	Mohamed V dam	49 920	1961-90	1000	12	240**

* from measured values

** from the reservoir sedimentation

Changes in coastal morphology

As the coasts are geomorphological features resulting from the existence of a balance between the dynamics of the continental drainage basin and the dynamics of the marine receiving basin, they may be very sensitive to any natural or anthropogenic change occurring in one of these systems.

The Moulouya coastal plain provides an interesting case study for examining the effects of natural and man-induced changes on the shoreline morphology. These changes were investigated by Zourarah (1994) and Zarki (1999) using topographic maps and the comparison of two sets of aerial photographs (1958-1988) of the region. Over about 40 years, the river has made the following changes :

- In 1958, the lower Moulouya River course was sinuous to meandering, and the river mouth was much wider than present, with an oblique angle to the coastline (Figure 2). The fluvial load was heavy enough to lead to the progradation of deltaic deposits in the eastern part of the river mouth.
- In 1963 the Moulouya River basin was subjected to major floods (the largest ever recorded) that caused important changes in the morphology of the channels and the coastline. The floods caused interruption in the natural levees, and the channel made a short cut resulting in a straighter and shorter course. The littoral bars were eroded.
- After the 1963 floods, the lower river developed a braided channel morphology with a narrow channel and sandy bars.
- In 1967 the Moulouya River underwent damming and land management changed as a result of social influences. The river mouth and the coastal zone reacted with remarkable adjustments, consisting primarily of a change from a deltaic system to an estuarine system, and resulting in the erosion of the coastline.

Indeed, as the fluvial sediment load has greatly attenuated since the dam construction, and because of the weak fluvial hydraulic power, the marine factors have been reinforced, leading to reworking of the shoreline sediments, the narrowing of the mouth area and the development of mouth bars. These changes can be explained within the hydrodynamical and sedimentological context of the coastal zone. According to Zourarah (1994), the most frequent waves come from the east (44.5%) and from the west (30%). The significant wave height ranges between 1 and 2.5 m. With regard to longshore transport, the most effective waves and the induced sand transport are directed westwards. The net littoral transport is approximately 165,000 m³/yr. The sand transported was responsible of the accretion of the west coast, while the east coast, not fed by fluvial inputs, was retreating.

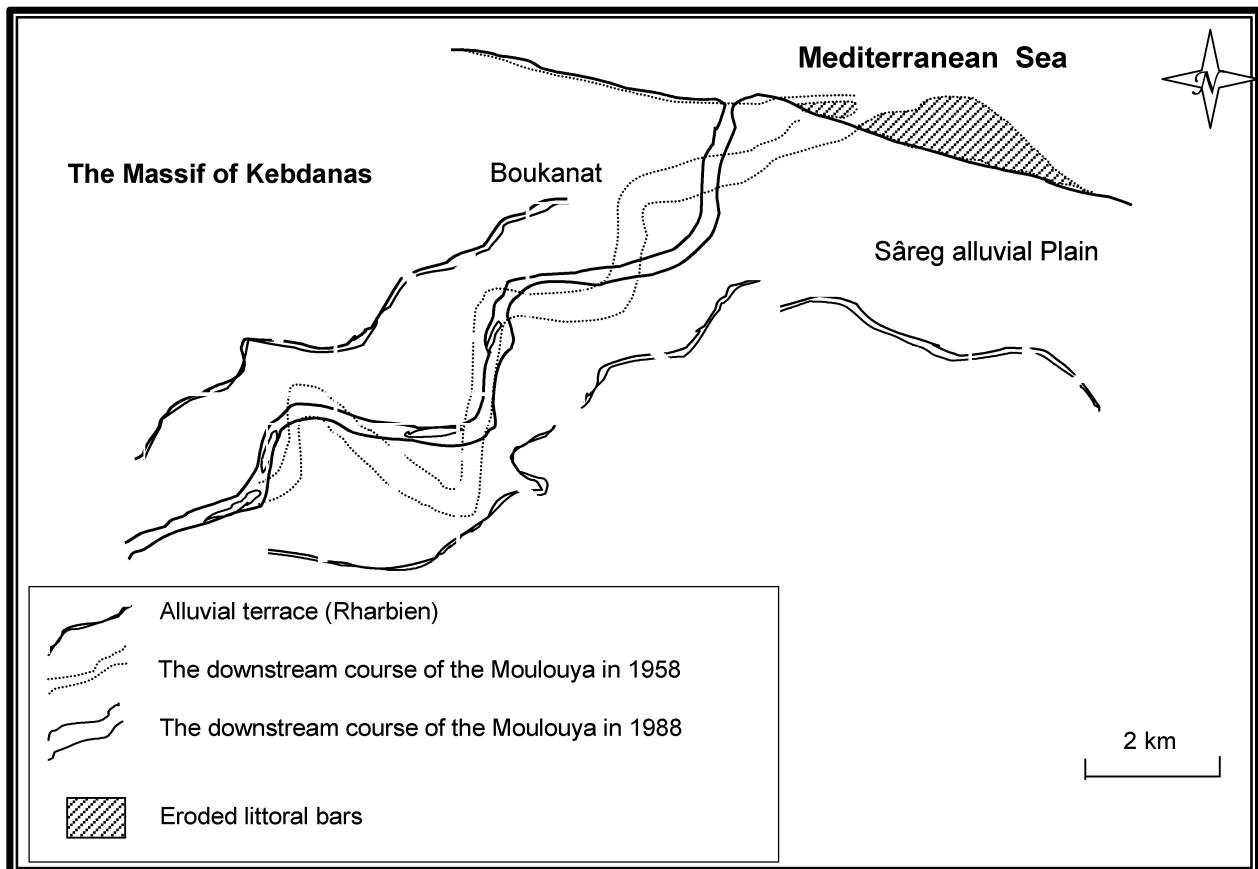


Figure 2. Historical evolution of the lower course of the Moulouya River and of the coastal morphology (from Zourarah 1994, modified).

It is more difficult to link the shoreline evolution of the Sebou coastal plain to the river damming activities, since the causes of this evolution are manifold and affect the coast at different rates and times.

Indeed, as well as the fact that the Sebou River is heavily regulated (78%), the huge population moving from the country to the coastal towns, the development of beach tourism, sand extraction for construction purposes, the construction of ports, jetties and defensive structures, combined with presumed sea-level rise, have interfered with the river basin activities and deeply altered the natural evolution of the coast.

According to investigations carried out for the Sebou Project (1970), it has been estimated that an average of 700,000 m³ of fluvial sands were deposited annually within the estuary, considerably restricting navigation. Indeed, a shoal culminating to 2m below low tide formed regularly between the jetties. In order to maintain an adequate depth in the navigational channel, it has been estimated by the Public Works authorities that a dredging of 800 000 m³ is required annually.

Nowadays, due to dams impoundment, the fluvial competence has become too weak for dispersing all the littoral transit, in spite of the relative importance of the tidal currents within the lower estuary. Moreover, as some dams were constructed for controlling flood discharges and coastal plain inundation, it is likely that the estuary is not flushing as frequently as before and it will become the site of enhanced siltation (Collins and Evans 1986).

Conclusion

The recent evolution of the Sebou and the Moulouya coastal zones is governed by different land-ocean interaction processes, supplemented by anthropogenic activities. The latter can cause a chain of impacts on the natural continuum of transfer of sediments from uplands to the coastal zone. Some of these impacts were evident from this study:

- The natural erosion rate is high in the Sebou and the Moulouya basins. It is however accelerated following the land-use changes, leading to serious losses of arable lands. For example in the Moulouya river basin, it is estimated (M.A. 1996) that by the year 2030, 70,000 ha of irrigated land and 300×10^6 kWh of electricity will be lost. In terms of replacement costs, this loss is equivalent to an annual economic loss of more than 950 million dirhams (about \$100 million). This estimate does not include the other direct and indirect effects on the environment, economic development and workmanship.
- Accelerated siltation of reservoirs compromises their storage capacity and shortens their life span. These reservoirs are indispensable to manage water resources under this type of climate.
- By reducing river supply, these reservoirs have also an impact on the morphological equilibrium of the shoreline. The impoundment of flow discharges, by modifying estuarine circulation and strengthening the marine hydrodynamical action, is responsible for coastal erosion/sedimentation, as noted by Barusseau *et al.* (1997) for the Senegal River after the construction of Dama dam. The siltation of estuarine zones entails costly dredging operations.

Thus although dams have obviously many socio-economic benefits, mainly in the semi-arid regions, these benefits are sometimes outweighed by their social, environmental and economic costs. One way to avoid such negative impacts is to introduce environmental indicators within economic budgets.

References

- Barusseau, J.P., Bâ, M., Descamps, C., Diop, E.S., Diouf, B., Kane, A., Saos, J.L., and Soumaré, A. 1998 Morphological and sedimentological changes in the Senegal River estuary after the construction of the Dama dam. *J. of Afr. Earth Sci.* **26**, n° 2: 317-326.
- Belkheiri, A., Compte, J.P., El Khabotti, A., Lahmouri, A. et Mirouah, D. 1987 Bilan de cinq années de sécheresse au Maroc. *Rev. Eau Dev.* n° 3, 10-26.
- Collins and Evans 1986 The influence of fluvial sediment supply on coastal erosion in west and central Africa. *J. Shoreline Management* 2:5-12.
- DMN 1993 Le point sur la sécheresse au Maroc. Direction de la Météorologie Nationale. *Rev. Eau Dev.* n° 16: 26-31.
- DRPE 1994 Les grands barrages du Maroc. *Publication de l'administration de l'hydraulique*, 80 pages.
- Haida, S., Probst, J.L, Ait For a, A. et Snoussi, M. 1999 Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant du Sebou entre 1940 et 1994. *Rev. Sécheresse* n° 3, vol. **10**:221-228.
- Haida, S. 2000 Transports de matières et bilan de l'érosion mécanique et de l'altération chimique dans un bassin versant de zone semi-aride: le Sebou. Impacts des variations climatiques et des activités humaines. *Thesis Ph.D, Univ. Ibn Tofail, Kenitra*, 255 pages.
- Haida, S., Probst, J.L et Snoussi, M. (submitted) Impact of the construction of the dams on water and sediment discharges in the semiarid basin: The Sebou (Morocco). *Regulated Rivers*.
- Hay, B.J. 1994 Sediment and water discharge rates of Turkish Black Sea rivers before and after hydropower dam construction. *Environmental Geology* **23**: 276-283.
- Heusch, B. et Millies-Lacroix, A. 1971 Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin. Application au Maghreb. *Mines et Géol. Rabat.* n° **33**:21-39.
- Lahlou, A. 1996 Environmental and socio-economic impacts of erosion and sedimentation in North Africa, Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (*Proceedings of Exeter Symposium, July*) n° **236**: 491-500.
- M.A. 1996 Plan d'aménagement du bassin versant de la Moulouya. *Rapport interne, Ministère de l'Agriculture, Rabat*.
- Poulos, S.E. and Chronis, G.T.H. 1997 The importance of the river systems in the evolution of the Greek coastline. In: Transformations and evolution of the Mediterranean coastline. *Bull. Inst. Océanographique, Monaco*, n° spécial **18**, *CIESM Science Series*: 75-96.
- Probst, J.L. et Amiotte-Suchet, P. 1992 Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydro. Sci. J.* **37** n° 6:621-637.
- Projet Sebou 1970 Rapport général. "Développement régional du Sebou", Annexe 10 Rabat. 53 pages.

- Simeoni, U., Bondesan, M. 1997 The role and responsibility of man in the evolution of the Italian Adriatic coast. In: *Transformations and evolution of the Mediterranean coastline*. Bull. Inst. Océanographique, Monaco, n° spécial 18 CIESM Science Series: 111-132.
- Snoussi, M., Jouanneau, J.M. and Latouche, C. 1989 Impact du climat sur les apports fluviatiles à l'océan. Etude comparative des flux de l'Adour, du Sebou et du Souss. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, n° 35:23-30.
- Snoussi, M., Jouanneau, J.M. and Latouche, C. 1990 Flux de matières issues de bassins versants de zones semi-arides (Bassins du Sebou et du Souss, Maroc). Importance dans le bilan global des apports d'origine continentale parvenant à l'Océan Mondial. *J. of Afri. Earth Sci.* 11 (1/2):43-54.
- Stockton, C.W. 1993 Etat des connaissances du climat et de ses variations au Maroc. *Rapport*, 13 pages.
- Zarki, H. 1999 Evolution de la Sédimentation fluviatile en Basse Moulouya (Maroc) au cours de l'Holocène. *Thesis*, n° 1250, Univ. Mohammed Ben Abdellah, Fes, 370 pages.
- Zourarah, B. 1994 La zone littorale de la Moulouya (Maroc nord-oriental). Transits sédimentaires, évolution morphologique, géochimie et état de la pollution. *Thesis*, n° 1250, Univ. Mohamed V, Rabat, 197 pages.

4.8 Modifications morphologiques dans la zone de l'embouchure du fleuve Sénégal après la construction du barrage de Diama

Alioune Kane

Introduction

La formation du delta du Sénégal remonte à la période post-nouakchottienne (6 800–4,200 BP?) qui correspond à une régression consécutive à une baisse du niveau marin. Une lagune s'est ainsi formée derrière un puissant cordon littoral. La morphologie du cours inférieur du fleuve Sénégal est celle d'un delta (Coleman et Wright 1975) dont les affluents ont été recapturés à l'Holocène, par le cours principal brusquement détourné vers le sud (Michel 1973; Monteillet 1988). Le delta du Sénégal a été classé (Coleman et Wright 1975) parmi le type extrême des deltas à prédominance très nette des effets de houle, qui a pour résultat une dérive littorale édifiant des cordons littoraux parallèles à la côte.

A la suite de la construction du barrage de Diama en novembre 1985 sur le cours inférieur du fleuve Sénégal, la partie estuarienne de la vallée, la zone d'embouchure et la zone côtière adjacente ont connu des transformations importantes.

Approche géomorphologique

L'estuaire du fleuve Sénégal est désormais limité en amont par le barrage anti-sel de Diama, tant que ses vannes restent fermées, et à l'aval par son embouchure, unique exutoire par laquelle remontent les eaux marines (Figure 1).

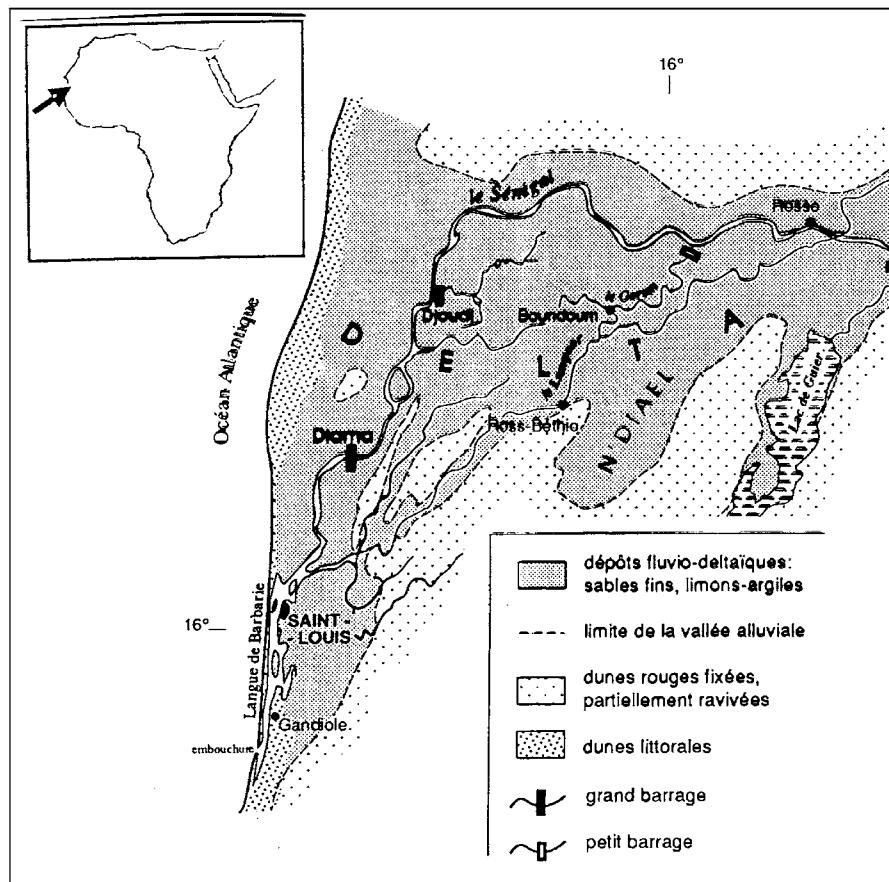


Figure 1. Carte de situation du delta du fleuve Sénégal (Michel *et al.* 1992).

Dans l'ultime partie de son cours, le Sénégal abandonne la direction est-ouest pour obliquier vers le sud et longer la mer en s'en rapprochant progressivement. Au niveau et en aval de la ville de Saint-Louis, le fleuve n'est plus séparé de l'océan que par un unique et mince cordon sableux de largeur décroissante du nord au sud constituant la Langue de Barbarie. Cette flèche littorale actuelle de sable fin blanc, qui est le plus récent des cordons littoraux du front deltaï que est le résultat d'un long processus alternatif d'engrassement et de démaigrissement de la plage par la dérive littorale.

Dans la zone côtière, la plaine d'inondation est étroite. Le Sénégal s'insinue dans des couloirs de largeur kilométrique, essentiellement sablo-argileux. Les alluvions fluviatiles sont limités à l'est par les dunes rouges continentales et, à l'ouest, par une succession de cordons littoraux qui constituent des alignements parallèles à la côte.

Le plateau continental, limité à l'isobathe 200 m, se prolonge sur près de 40 km au large de la région de Saint-Louis. Les relevés bathymétriques effectués au large par BBL-Sw (1985) montrent que le fond est relativement régulier. La pente, peu accusée, varie de 2 % à 1,66 % du rivage jusqu'à une profondeur de 10 mètres, au large de ce point, la pente devient moins accentuée, à raison de 0,25 %. Une importante zone vaseuse s'étend de part et d'autre de l'embouchure du fleuve Sénégal. Elle est alimentée par les particules limoneuses transportées par le fleuve jusqu'à la mer où elles sont reprises par les courants qui les entraînent vers le sud-ouest. Les fonds sableux occupent une surface réduite à proximité de la côte.

Variation de la position de l'embouchure

L'embouchure du Sénégal, depuis son origine, s'est déplacée très régulièrement vers le sud, avec par intermittence des replis de 4 à 5 km vers le nord. Au bout d'une période, durant laquelle l'embouchure déplacé d'une distance considérable vers le Sud et que la résistance hydraulique s'est accrue avec l'augmentation de la distance jusqu'à l'embouchure, une nouvelle brèche se produit dans le cordon littoral à 7-8 km au nord. De ce fait, le fleuve passe à travers la Langue de Barbarie, tandis que l'ancienne embouchure se ferme. au contraire. Celle-ci subsiste et peut se rattacher au continent par son extrémité méridionale. Il se forme alors, au sud de la passe, une lagune dont l'étendue est peu à peu réduite par la migration de la nouvelle embouchure.

Tableau 1. Extension de la langue de Barbarie et position de l'embouchure du fleuve depuis 1658 selon les cartes historiques (exprimées en km par rapport à l'île de Saint-Louis).

Année	Km								
1658	2,5	1840	20,0	1870	12,0	1913	20,0	1966	20,1
1692	20,0	1843	17,0	1872	12,4	1921	16,0	1967	21,3
1707	4,5	1846	9,0	1872	10,3	1923	15,0	1968	22,2
1717	25,0	1849	16,5	1874	11,5	1928	24,2	1969	22,5
1720	21,0	1849	3,4	1874	13,0	1928	20,8	1969	22,8
1726	10,0	1851	27,5	1882	17,0	1932	23,4	1970	20,0
1727	3,5	1854	4,5	1883	17,4	1936	15,7	1971	24,3
1738	12,0	1855	20,0	1883	14,0	1936	23,9	1973	15,0
1750	22,0	1856	4,5	1884	18,3	1948	16,8	1977	16,3
1780	9,0	1858	3,5	1884	14,4	1950	25,5	1978	19,6
1790	4,5	1859	-0,5	1887	12,1	1955	25,5	1980	21,5
1801	27,5	1860	5,0	1889	15,7	1958	27,0	1981	21,8
1802	18,0	1861	10,9	1894	14,3	1958	27,0	1983	21,0
1802	19,0	1862	8,5	1897	12,8	1959	27,0	1986	23,5
1810	6,0	1863	2,5	1904	18,3	1959	16,5	1989	27,5
1820	7,0	1864	6,0	1905	15,0	1960	16,7	1990	28,0
1824	15,0	1865	8,0	1906	15,7	1960	18,9	2000	30,0
1825	14,4	1866	1,5	1908	16,5	1962	18,0		
1827	30,0	1867	16	1909	20,0	1963	17,7		

De 1850 à 1900, 7 ruptures ont été dénombrées. La plus importante a eu lieu en 1884 provoquant le démantèlement du cordon sableux sur près de 4 km (l'allongement de 24 km entre 1850 et 1851 paraît trop considérable pour être vraisemblable). Depuis 1900, 13 ruptures d'importance inégale se sont produites, la plus récente date de 1973.

Facteurs morphodynamiques

Circulation oceanique et dynamique littorale

Les contours de la côte du delta du Sénégal sont le résultat d'un état d'équilibre entre l'action du fleuve et des courants de houle.

La morphologie de l'avant-côte est marquée de sillons perpendiculaires au rivage, profonds de 0,6 à 1,3 m et larges de 3 à 5 m, qui se succèdent régulièrement sur une zone de 30 à 40 m.

L'onde de marée qui se manifeste sur la côte Saint-Louisienne vient du sud. Elle est de type semi-diurne, mais présente tout de même une composante diurne de l'ordre de 20 cm d'amplitude. Le marnage est microtidal, à peine supérieur à 1 m en niveau et 0,50 m en morte eau, ce qui a pour conséquence un faible développement des estrans.

On observe deux grandes circulations superficielles (Rebert 1983): le courant nord-équatorial qui transporte vers l'Ouest les eaux froides du courant des Canaries et le contre-courant équatorial qui transporte vers l'est les eaux chaudes et salées formées sur la bordure sud du tourbillon nord-atlantique. Pendant la saison des alizés, de novembre à mai, les courants océaniques, au large de Saint-Louis, sont essentiellement tributaires du courant froid des Canaries. Les courants de surface, d'une vitesse de l'ordre d'un nœud, portent au S-W entre Saint-Louis et Dakar (Domain 1977).

Les côtes sénégalaises sont baignées par d'importantes remontées d'eaux profondes ou "up-wellings" qui proviennent de la région des eaux centrales sud-atlantiques (Rebert 1977). Ces courants se manifestent intensément de février à avril entre Saint-Louis et Dakar et dépendent essentiellement de deux facteurs: la morphologie du plateau continental et le régime du vent. BBL-SW (1985) a enregistré, à 9 mètres de profondeur, des vitesses de courant entre 5 et 20 cm.s⁻¹ avec des pointes de 42 cm.s⁻¹ et avec une direction prédominante du sud (80 % du temps), entre janvier et juin 1983. Dès le début de la saison humide, les masses d'eau méridionales repoussent le front des remontées d'eaux froides. Le courant de surface se propage alors du sud au nord à une vitesse entre 5 et 15 cm.s⁻¹, avec des pointes de 30 cm.s⁻¹ (BBL-SW 1985).

Deux types de houles, dont les caractéristiques sont différentes selon leur origine et les saisons, se manifestent alternativement dans la région de Saint-Louis:

- La houle de NW prédomine pendant toute la saison sèche d'octobre à juin et a pour origine les tempêtes lointaines de l'Atlantique nord du quadrant NW (N 320° à N 360°). Cette houle atteint la côte sous forme de trains de grande longueur d'onde (en moyenne de 190 à 300 mètres). Son amplitude est généralement plus forte, les valeurs moyennes étant comprises entre 1 et 1,6 m et elle se propage à une vitesse de l'ordre de 22 m/s. La direction moyenne de propagation, pour ces houles d'origine septentrionale, se situe par 22° nord-ouest. A l'approche de la côte de Barbarie, elles subissent une réfraction sur le fond au niveau du plateau continental. Elles perdent alors une grande partie de leur énergie et déferlent plus ou moins obliquement par rapport à la côte. La houle de NW provoque une mobilisation puis un important transport de sable dans le sens nord-sud.
- Les houles du SW se manifestent de juin à octobre et ont pour origine les grands vents d'ouest de l'Atlantique sud. Elles sont liées par leur direction et leur fréquence aux flux de mousson issus de l'Anticyclone de Ste Hélène. Leur amplitude est moins importante avec des valeurs moyennes comprises entre 0,80 et 1,20 m et leur période plus courte (entre 5 et 10 secondes). Leur action est aussi moins marquante. Elles perdent une bonne partie de leur énergie par suite d'une diffraction subie au niveau de la presqu'île du Cap-Vert, véritable écran dont l'abri englobe toute la Langue de

Barbarie. Cette période des houles australes correspond au "démaigrissement" de la plage par suite de la diminution du transport du matériel sableux.

Sur la côte, toutes ces houles, surtout celles du NW, engendrent surtout la dérive littorale. C'est à son existence que l'on attribue la faible élévation du seuil de l'embouchure du fleuve Sénégal. Elle a une direction N-S en face de la Langue de Barbarie ; sa vitesse varie entre $0,13$ et $0,57 \text{ m.s}^{-1}$. Barusseau *et al.* (1993) indiquent des valeurs mesurées de $0,30 \text{ m.s}^{-1}$ qui se corrélatent assez bien avec des valeurs calculées notamment par la formule d'Eagleson, soit $0,5$ à $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ selon Nedeco (1973). Le transport de sable occasionné par cette dérive littorale se produit surtout dans cette zone des brisants à moins de $2,50 \text{ m}$ IGN de profondeur (Ostenfel et Jonson 1972). On évalue à environ $600,000 \text{ m}^3$ le volume de sable apporté annuellement à l'extrémité sud de la Langue de Barbarie à partir des relevés topographiques et de son allongement moyen annuel vers le sud.

Dans la vallée estuarienne, l'onde de marée en régime naturel pouvait se propager dans le fleuve jusqu' à 450 km de l'embouchure, par suite de la position du lit en contrebas de l'océan. Dans l'estuaire court actuel, elle est réfléchie à partir de la limite amont, c'est-à-dire le barrage de Diama, une vague est alors propagée vers l'embouchure.

Durant la période de la saison sèche, les vitesses du courant diminuent en fonction de la profondeur et au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure. A Gandiole, on enregistre des vitesses de près de 50 à 70 cm.s^{-1} . On note, pour les durées d'écoulement, un équilibre relatif entre flot et jusant, notamment pour les valeurs fournies par les mesures de surface et de profondeur intermédiaire. Par contre, les vitesses de fond de chenal révèlent un rapport plutôt en faveur du jusant. Les maxima de vitesse du jusant dépassent ceux du flot. Cette primauté du jusant sur le flot est la traduction du comportement normal du fonctionnement estuarien.

Au cours de la saison des hautes eaux, le courant dans l'estuaire se dirige vers l'aval. Le niveau fluvial est élevé et relativement constant. La vitesse maximum du courant, lors de la marée, a été d'environ 70 cm.s^{-1} .

L'évolution de la vallée estuarienne est sous la dépendance des apports sédimentaires transportés par les flots annuels de la crue, d'une part, et par les actions de remontée des eaux océaniques dans l'estuaire pendant la saison des basses eaux, d'autre part. Le transport solide du fleuve Sénégal reste relativement faible, mais est surtout variable d'une année à l'autre.

Tableau 2. Bilan des flux particulaires à l'embouchure du fleuve Sénégal

	Concentration (en mg/l)	Volume écoulé (en m^3)	Masse (en tonne)
Diama			
Cycle 89/90	218,32	$8,742.10^9$	1 908 716,54
Cycle 90/91	90,49	$6,931.10^9$	627 239
Cycle 91/92	187,65	$9,073.10^9$	1 702 680
Cycle 92/93	125,28	$7,640.10^9$	957 160
Cycle 93/94	190,31	$8,532.10^9$	1,86E+12
Saint-Louis			
Cycle 81/82	251,7	$11,384.10^9$	2 865 245
Cycle 82/83	155,5	$7,625.10^9$	1 185 903

C'est un fleuve de faible compétence dans son estuaire. Les argiles et les limons transportés en suspension auront donc tendance à se déposer. A l'heure actuelle, le fleuve Sénégal ne joue pas un rôle essentiel dans l'édification de la flèche littorale de la Langue de Barbarie. Il peut, en revanche, contribuer à l'érosion du cordon au cours de la crue.

Observations morphologiques

Les transformations morphologiques de la vallée estuarienne sont également étudiées dans le secteur de référence de l'observatoire de Gandiole (les profils sont numérotés BAR 1F à BAR 16F). Le suivi bi-annuel s'est déroulé par saison et de façon régulière:

- au mois de juin, en période de pré-hivernage, en fin de saison sèche lorsque l'estuaire du Sénégal est soumis aux effets de la marée dynamique et aux flots des eaux océaniques ;
- aux mois d'octobre-novembre, durant la période post-hivernage, lorsque les eaux fluviales d'origine continentale fortement chargées en matières en suspension recouvrent uniformément l'ensemble du bassin-versant du fleuve Sénégal.

Le profil topobathymétrique de la Langue de Barbarie et de son avant-côte comprend trois sections : la plage avec son cordon dunaire, la proche avant-côte et le glacis. Les deux premières sont sujettes à d'importantes variations. Le glacis, quant à lui, présente de modestes transformations qui, en général, ne conduisent qu'à de faibles translations d'ensemble du profil. Le secteur de la base permanente de Gandiole (Figure 2) peut être découpée, d'un côté en deux parties : le nord de la base large (P1-P4) et la base serrée (P5-P13) et, de l'autre, le sud de la base large. La différence entre ces deux domaines est dans la pente moyenne, plus faible au sud qu'au nord (respectivement 0,95 à 1,37 % et 1,71 à 1,94 %).

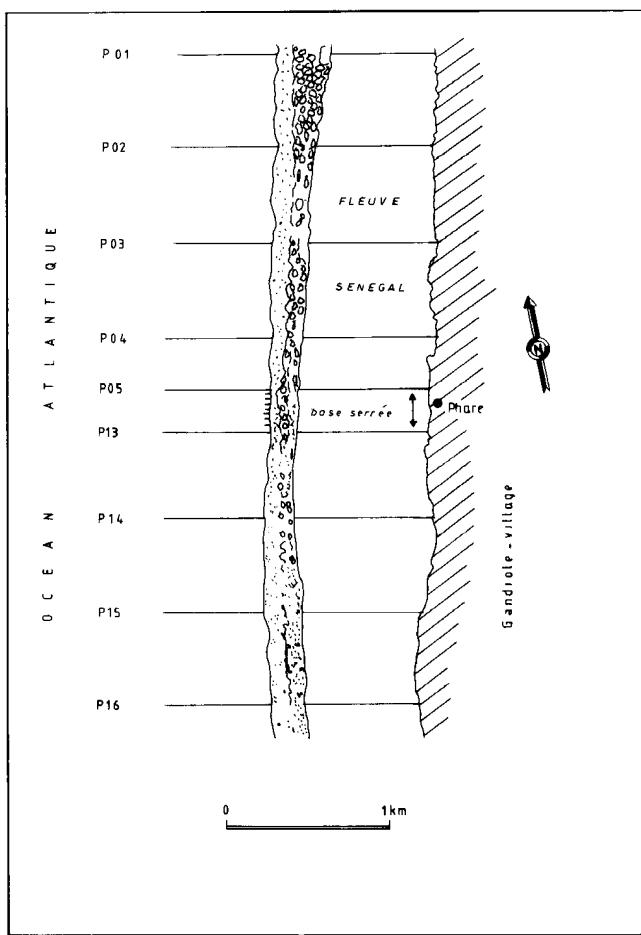


Figure 2. Localisation et disposition de la base d'observations fluvio-marines de Gandiole.

Les observations topobathymétriques dans la vallée estuarienne

Les profils de la base serrée, situés à 50 m de distance les uns des autres, permettent de constituer des ensembles de cartes et de blocs-diagrammes dont on ne présente ici que quelques exemples (Figures 3 et 4). Le chenal présente une section en forme de V aux pentes généralement irrégulières et dissymétriques. Le fond est étroit entre 6 et 8 m de profondeur et localement, des bancs coquilliers altèrent la régularité de l'axe.

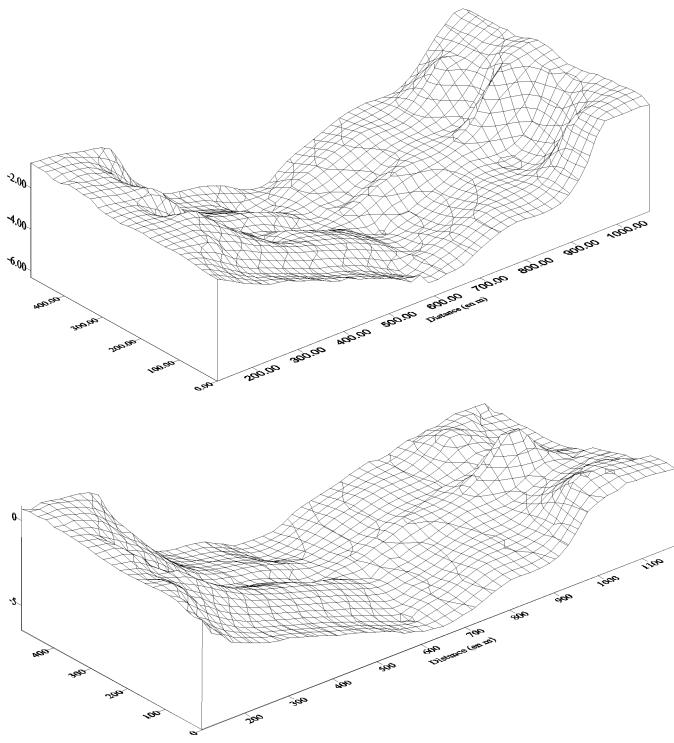


Figure 3. Représentation tridimensionnelle des variations morphologiques de la vallée estuarienne à Gandiole en 1989 et en 1990.

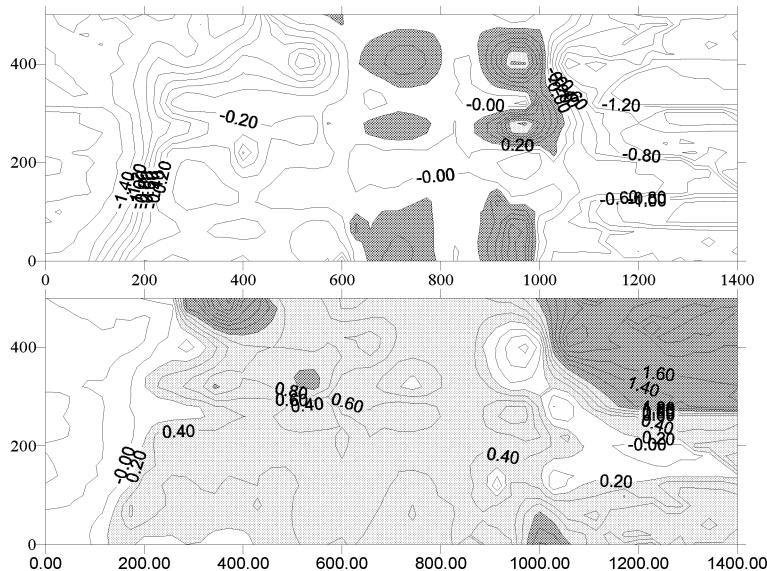


Figure 4. Isovaleurs d'érosion et de sédimentation dans la vallée estuarienne à Gandiole.

L'évolution générale des profils sur la base de Gandiole montre que les versants sont soumis à l'érosion ou à l'accumulation des sédiments en fonction des saisons. La comparaison de la morphologie pré- et post-hivernage montre une régularisation par la crue du fleuve qui se reproduit d'une année sur l'autre (oct.90 - nov.91). Cette modification se superpose à un processus général d'érosion que l'on perçoit bien quand on observe les cartes de différences (Figure 4). Elles expriment les variations de la profondeur d'une période à l'autre. La grande majorité des différences positives (approfondissement entre la date antérieure et la date postérieure) traduit la dominance d'un régime actuel d'érosion dans le chenal.

Tableau 3. Variation surfacique (en m²) du maître-couple sédimentaire sur les profils de la base de Gandiole.

	juin 89/oct.89	oct.89/oct.90	oct.90/juin 91	juin 91/nov.91
BAR 5F	102	-275	258	-333
BAR 6F	118	-223	69	-121
BAR 7F	131	-618	382	-152
BAR 8F	192	-215	-51	-150
BAR 9F	187	-343	-59	-320
BAR 10F	208	-305	-67	-490
BAR 11F	-143	-642	-69	-317
BAR 12F	56	-1125	279	-131

Sur la base serrée (profils BAR 5F à BAR 13F), les variations surfaciques du maître-couple sédimentaire par profil et par intervalle de temps sont indiqués dans le tableau n° 3 ci-dessus. Sur l'ensemble des 29 mois considérés (de juin 1989 à novembre 1991), la variation moyenne en volume se traduit par un déficit de l'ordre de 400 m³ par mètre linéaire de rive, soit un approfondissement moyen d'une trentaine de centimètres. Les surfaces érodées les plus importantes ont été enregistrées sur les profils BAR 12F soit -125 m², et BAR 7F soit -618 m² entre octobre 89 et octobre 90. La surface d'accumulation la plus importante est remarquée sur BAR 10F, soit 208 m² entre juin 89 et octobre 89.

En réalité, cet approfondissement n'est pas régulier dans l'espace. Il est presque systématiquement en rive gauche. En effet, quand l'accumulation domine, elle a lieu plutôt en rive droite (Langue de Barbarie). Les rares fois où des dépôts s'observent sur la rive gauche, ils ont lieu plutôt en bas de versant du chenal qu'en haut.

Cet approfondissement n'est pas non plus uniforme dans le temps et ne caractérise pas systématiquement l'un des deux régimes saisonniers plutôt que l'autre. Ainsi, une majorité de dépôts est observée en hivernage 1989 (+ 100 m³ par mètre de rive) mais aussi en saison sèche 1990/1991 (+ 50 m³ par mètre de rive). Pendant l'hivernage 1991, l'érosion domine (- 200 m³ par mètre de rive). De même, à l'issue d'un cycle annuel complet (octobre 1989-octobre 1990), le déficit atteint 350 m³ par mètre linéaire de rive sur l'ensemble de la base. Ainsi, sur la base de Gandiole, l'accumulation se fait en saison sèche, alors que l'érosion se déroule surtout pendant la saison des hautes eaux.

Les observations topobathymétriques sur le littoral

Caractères généraux

La morphologie générale de la zone marine comprend un secteur fluctuant entre le rivage et les fonds de -3 à -4,5 m. La limite inférieure est marquée par une barre sédimentaire dont le relief, quand il existe, ne dépasse pas un mètre. Cette barre d'avant-côte n'est parfois qu'un épaulement infléchissant la courbe du fond. Parfois, elle disparaît dans le changement de pente qui sépare l'avant-côte du glacis.

La pente moyenne de l'avant-côte, *sensu stricto*, présente des valeurs intermédiaires au niveau de la base serrée de l'observatoire (bornes P5 à P12) par rapport au nord (P1) où la pente est plus forte et au sud (P15 et 16) où elle est plus faible. Sur P10, la valeur la plus faible (juin 1990) atteint 1,13 % tandis que la plus forte (novembre 1991) s'établit à 3,22 %. Sur P16, ces limites sont respectivement 0,78 % (juin 1991) et 3,24 % (juin 1989).

Changements dans la position de la ligne de rivage

Ils sont indiqués dans le tableau n° 4 en rapport avec la position qu'elle occupait en juin 1989. En effet, on constate à l'issue de la saison sèche 1988-1989 un maximum de recul de la côte sur la majorité des profils.

Tableau 4. Variation (en m) de la position de la ligne de rivage par rapport à la situation de juin 1989

PROFIL	1-10-1989	1-06-1990	1-10-1990	1-06-1991	1-11-1991
P1	31	41	123	41	31
P5	41	51	72	72	-31
P6	00	20	41	82	51
P7	62	51	82	82	72
P8	72	41	72	51	62
P9	00	-10	00	00	-10
P10	-1000	31	-10	00	41
P11	-5	123	93	93	113
P12		10	00	-10	-5
P15		41	20		51
P16		00	-31	-82	

D'une manière générale, le rivage a progressé, d'octobre 1990 à juin 1991, dans la partie septentrionale de la zone. Dans la moitié sud de la base serrée, un recul s'instaure au contraire dans cette période mais la tendance s'inverse ensuite de nouveau. L'opposition est nette, à cet égard, entre les profils de P9 et P10. On doit noter également qu'entre octobre 1989 et juin 1990, la croissance de la largeur de la plage subit un ralentissement ou s'inverse même (P9). A l'extrémité méridionale (P15 et P16), l'évolution est également très contrastée. Il y a donc en permanence, sur l'étendue du rivage, des secteurs en érosion quand d'autres s'engraissent.

Modification des profils

Quelques profils topobathymétriques (1 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8) sont présentés (Figure 5).

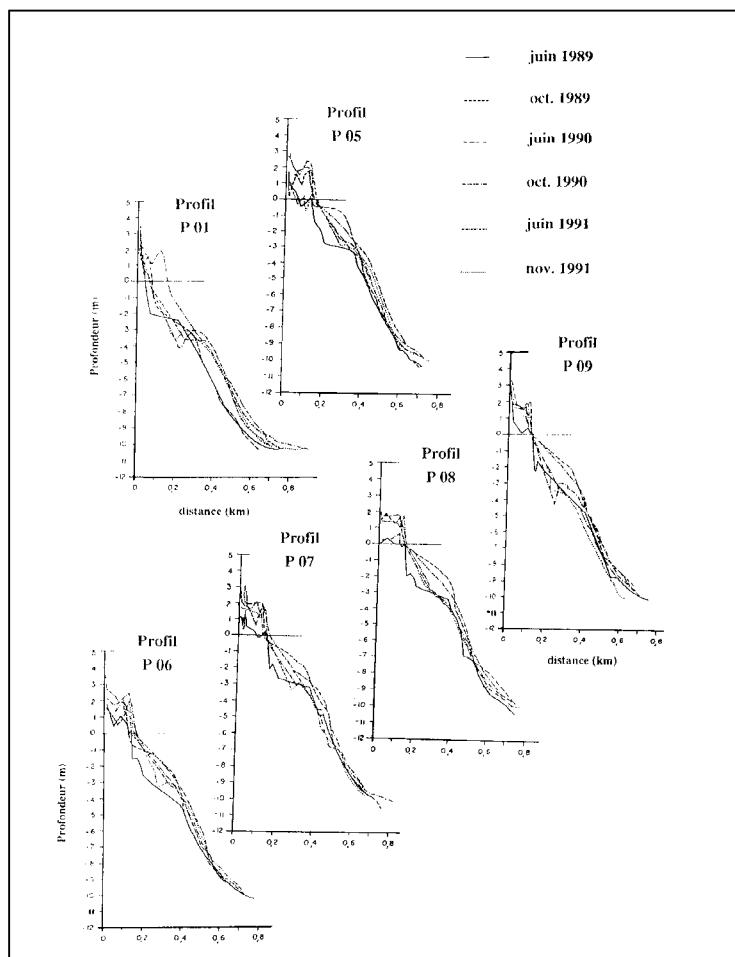


Figure 5. Variations morphologiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole, entre 1989 et 1991.

La partie émergée

En juin 1989, la plage est très rétrécie et généralement basse. L'arrière-plage, dans ces conditions, est en pente redressée pour se raccorder au pied du cordon dunaire. Sur certains profils (P5, P7), une bâche d'arrière-berme peut se situer sous le niveau de BM.

Dans la période suivante, la plage se construit. Cette accréition est en moyenne de 60 m sur la base serrée (nulle sur P9 et maximum 125 m sur P11). La progradatation correspond à l'édification d'une plage moyenne s'articulant avec le revers de berme au niveau d'une bâche de HM. Entre juin et octobre 1989, ce processus s'est réalisé en deux phases marquées par la formation de deux bermes successives dont la plus interne est fossilisée par la berme vive observée en octobre.

La berme vive présente une crête située au voisinage de +2 m par rapport aux BM. Elle est précédée par un estran de jet de rive étiré sur une trentaine de mètres et dénivélé d'environ 2 m par la marée. La pente y est généralement forte (de 5 à 7 %).

Au cours des trois années étudiées, on ne peut donc pas dire qu'il y ait eu une évolution négative du littoral de la langue de Barbarie dans la région de Gandiole.

Variation cartographique

Elles ne concernent que la base serrée, où les profils sont suffisamment rapprochés les uns des autres. Dans les cartes de la Figure n° 6, la représentation concerne aussi bien la partie émergée (plage et base du cordon dunaire) que la partie sous-aquatique (avant-côte).

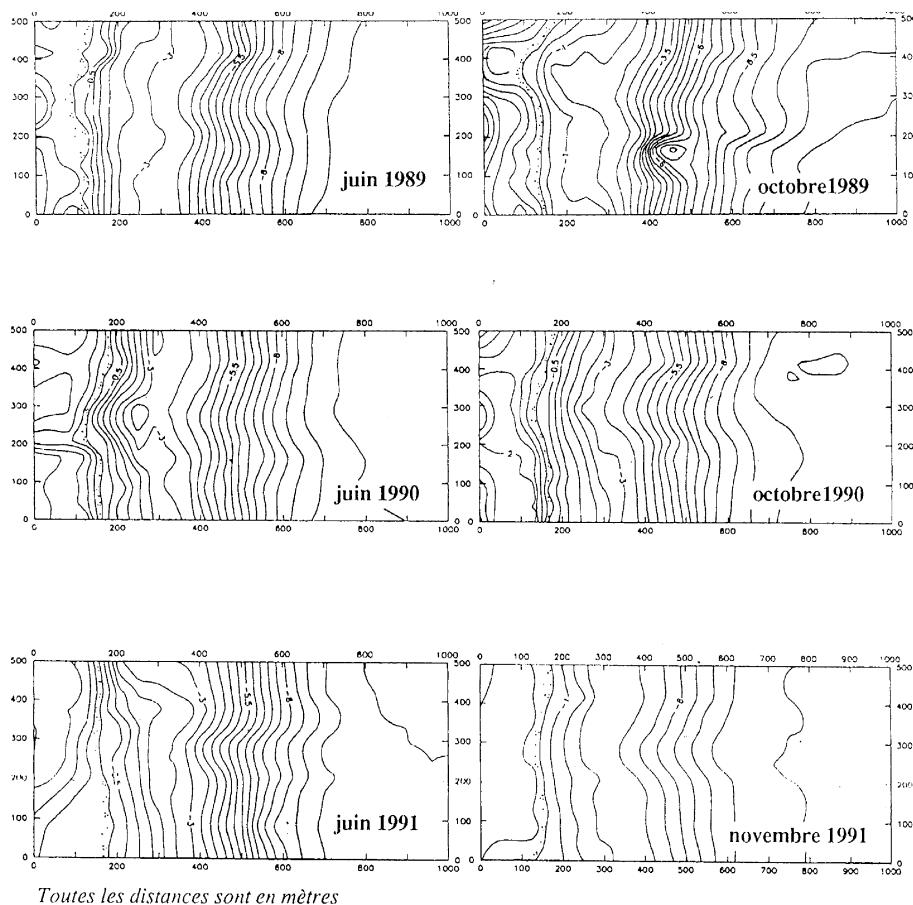
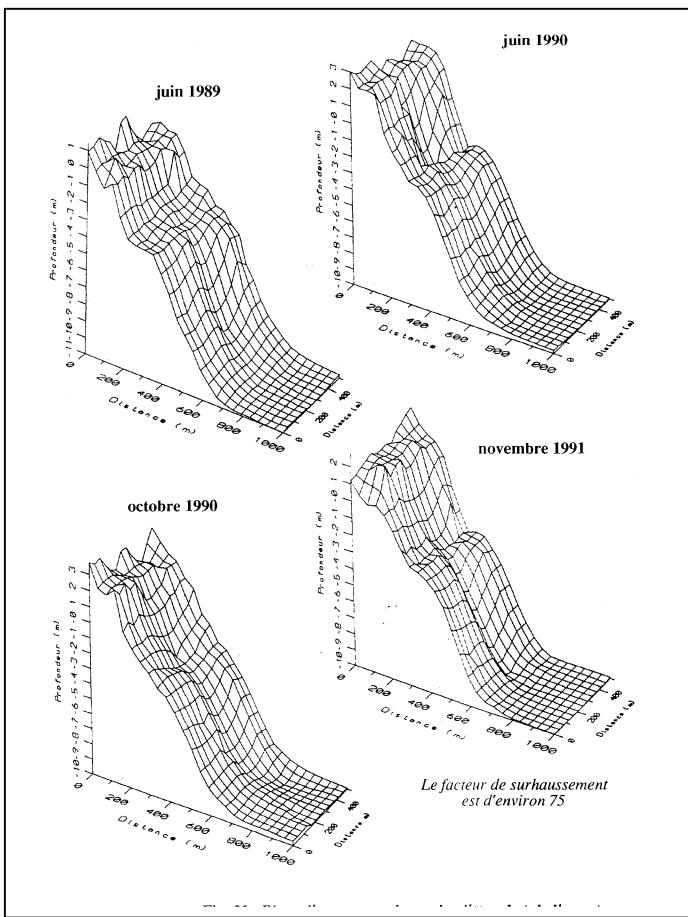


Figure 6. Cartes topographiques du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole entre 1989 et 1991.



La ligne de rivage est soulignée par un pointillé du côté terre. On note que la basse plage (zone du jet de rive, jusqu'à la crête de berme) ne se distingue pas morphologiquement de la proche avant-côte. L'épaulement où se développe la barre d'avant-côte se matérialise par un desserrement des isobathes dans le domaine - 2,50/- 4 m entre deux régions plus pentues.

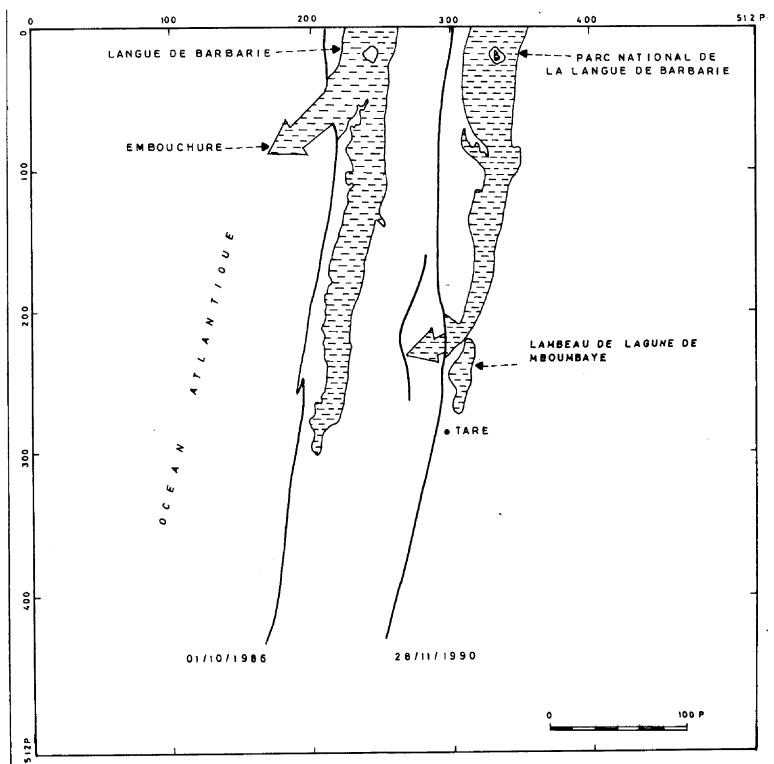
Quelques blocs-diagrammes, présentés à titre d'exemple (Figure 7), montrent plus clairement ces différences. On y voit la relation qui existe entre l'épaulement et la barre d'avant-côte et le passage progressif de l'un à l'autre.

Figure 7. Blocs-diagrammes du cordon littoral et de l'avant-côte au large de Gandiole.

Les modifications morphologiques dans la zone d'embouchure

A la suite de la construction du barrage de Diama, en novembre 1985, sur le cours inférieur du fleuve Sénégal, la partie estuarienne de la vallée, la zone d'embouchure et la zone côtière adjacente ont connu des transformations importantes, illustrées par la comparaison des cartes issues d'images satellites de 1986 et de 1990 (Figure 8).

Figure 8. Evolution de la position de l'embouchure du fleuve Sénégal d'octobre 1986 à novembre 1990.



Nous remarquons :

- une extension vers le sud de la Langue de Barbarie qui, mesurée sur les deux images s'est allongée de près de 4 000 m;
- un élargissement et un épaissement du segment distal de la Langue de Barbarie qui fonctionne comme une zone d'accumulation des sédiments;
- un raccourcissement de la flèche sableuse de la lagune de Mboumbaye, dont la portion terminale est complètement isolée du système estuaire.

Les variations morphologiques sont étroitement liées à l'hydrodynamisme estuaire, contrôlé depuis 1985 par le fonctionnement du barrage de Diama.

L'évolution actuelle de la Langue de Barbarie est plutôt marquée depuis le début des années 1980, par le rétrécissement du rivage externe et aussi par l'allongement de sa pointe méridionale. Ceci est confirmé par l'ensablement partiel ou l'exhaussement du mur de protection, encore présent sur la plage à Saint-Louis. L'érosion est très marquée avec un recul de la haute plage et du sillon oblique de 12,5 m au droit de Guet-Ndar et de 2,5 à 5 m ailleurs au cours de la saison sèche (Ba et Sy 1987).

Conclusion

La position de l'embouchure du fleuve Sénégal est naturellement évolutive, mais cette instabilité demeure aujourd'hui limitée depuis l'avènement des barrages. Les remaniements sont désormais tributaires des apports continentaux piégés par le barrage de Diama qui opère une importante rétention sédimentaire. La zone littorale de la Langue de Barbarie, siège de la pérégrination de l'embouchure du fleuve, a été étudiée au point de vue morphologique au nord de la localisation actuelle de la passe. La partie sud de la flèche paraît en état d'accrétion (pente plus faible de l'avant-côte et sensibilité nulle à l'érosion), tandis qu'au niveau de la base serrée (face à Gandiole), la partie basse du profil transversal sous-marin montre un certain déséquilibre. Celui-ci pourrait entraîner l'apparition de conditions favorables à la formation d'une embouchure plus septentrionale que l'actuelle. La prévision d'une ouverture de l'embouchure en position plus septentrionale doit être considérée avec prudence.

Bibliographie

- Ba, M. et Sy, I. 1987 Introduction à la sédimentologie de la Langue de Barbarie et à l'hydrologie de l'estuaire du Sénégal. Etudes des estuaires et des lagunes du Sénégal. *Rapport final Equipe pluridisciplinaire d'Etude des Ecosystèmes côtiers (Epeec.)*, (Ucad), Unesco, Pnud, 41 p., Dakar, déc. 1987.
- Bbl-Sw, Omvs, Acdi 1985 Etudes des ports et escales du fleuve Sénégal. Port de Saint-Louis. *Etudes hydrographiques et hydrauliques*. Rapport n° 20, 149 pages + annexes.
- Coleman, J.M. et Wright, L.D. 1975 Modern river deltas : variability of process and sand bodies. Pages 99-149 in Broussard, M.L. (ed.): *Deltas*. Houston Geol. Soc.
- Kane, A. 1997 L'après-barrages dans la vallée du fleuve Sénégal. Modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles. *Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Cheikh Anta Diop*, 551 pages, annexes, 168 figures.
- Michel, P. 1973 Les bassins du Sénégal et de la Gambie: étude géomorphologique. *Thèse Lettres, Géographie, Univ. Strasbourg ; Mém. ORSTOM, Paris* 63, 3 tomes, 753 pages.
- Michel, P., Sall, M., Barusseau, J.P. et Richard J.F. 1992 Projet Campus: l'après-barrage dans la vallée du Sénégal. Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques: conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. *Rapport final*. Ulp, Strasbourg, 10 pages + annexes.
- Monteillet, J. 1988 Environnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire. *Thèse de Doctorat, 1986, Univ. de Perpignan, Lab. de Sédimentologie Marine*, Perpignan, 1988, 267 pages.
- Rebert, J.P. 1983 Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. *Doc. Scient. Centr. Rech. Océanogr., Dakar-Thiaroye*, n° 93, 186 pages.

4.9 Catchment activities in the Volta River Basin and their impact on the Gulf of Guinea

Chris Gordon

Extended abstract

The Volta River basin, with an area of almost 400,000 km², is the ninth largest river/lake basin in sub-Saharan Africa. It covers six nations (Benin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Ghana, Mali and Togo) and contains some of the sub-region's most important environmental, social, land and economic resources. The basin provides water for hydroelectric power generation, domestic supplies, irrigation, livestock watering, transportation, and fisheries.

The primary environmental problems facing the Volta River basin stem from poverty and lack of equity in the distribution of and in access to resources. Throughout the basin, chronic poverty is the main cause and consequence of environmental degradation, which continues to undermine sustainable economic development. This is because poverty drives populations into the unsustainable use of natural resources and onto marginal lands. According to UNDP/World Bank classification these countries are amongst the poorest in Africa with high population growth rates and low *per capita* incomes (Table 1).

Table 1. National statistics on population growth rates, income and debt of countries sharing the Volta River basin.

Country	Population Growth Rate (% per year; 1998 estimate)	GNP <i>per capita</i> /yr. (US\$ 1997 estimate)	Debt as % of GNP (1995 estimate)
Benin	3.31	380	75
Burkina Faso	2.72	250	65
Côte d' Ivoire	2.21	710	161
Ghana	2.13	390	85
Mali	3.24	260	121
Togo	3.52	340	107

The construction of various large- and small-scale impoundments in all the riverine nations has caused significant changes to the environment and consequently to the distribution and livelihoods of people both upstream and downstream of the dams. These changes extend to the coastal wetlands associated with the Volta Estuary. In addition, the coastlines of some of the riparian countries have experienced coastal erosion as the possible consequence of reduction in sediment flux.

The largest of these impoundments, the Volta and Kpong dams in Ghana, are the major sources of electricity for Ghana (currently providing almost 95% of total consumption), with over 10% of total production (≤ 70 MW) exported to the neighbouring countries of Togo and Benin. The decline in the lake's water level due to reduced inflows caused by drought and the unsustainable rate of abstraction has resulted in episodic and catastrophic energy shortfalls affecting Benin, Ghana and Togo (as an indication, over the past decade the reservoir has been operating below its minimum design depth of 75.6 m). As a further indication of the overall water scarcity in the area concerned, according to recent expert estimates¹, three of the six riparian countries, Burkina Faso, Ghana and Togo are expected to face water stress (i.e. water availability of between 500 and 2000 m³/person/year) by the year 2025. The problem of water availability caused by population increase and life style expectation/changes is compounded by short-term climatic variability, which is manifested in the form of Sahelian drought. Linked to this issue is the overarching problem of increased evapo-transpiration, which further reduces water availability in dry years.

¹ Gardner-Outlaw, T. and Engleman, R. (1997) Sustaining Water, Easing Scarcity: a Second Update. Population Action International, Washington, 19 pages.

Apart from the fundamental issue of the basic lack of water, whereby the majority of inhabitants of the Volta River basin currently do not have access to safe and secure water supply, the major environmental concerns of the Volta River basin include:

- Degradation of the quality of trans-boundary water resources through the introduction of toxic chemicals, nutrients, pathogens, oxygen-demanding wastes, sediment and solid waste.
- Introduction of non-indigenous species causing the disruption of aquatic ecosystems as well as health threats through the creation of habitats for vectors and hosts of water-related diseases.
- Physical habitat degradation of lakes and water courses, wetlands, mangroves and estuaries as a result of land conversion, dredging, coastal construction and irrigation, and changes in water flow regimes downstream.
- Excessive exploitation of living and non-living resources, including over-fishing and water withdrawal, due to inadequate management and control measures.
- Soil erosion caused by factors such as deforestation, bush-fires and overgrazing, which leads to decreased water quality such as increases in turbidity and decreases in transparency, and in the long run loss of habitat by the siltation of water bodies.
- Explosive growth of waterweeds, one manifestation of eutrophication, which results from the over- and improper use of chemical fertilizers as well as the inadequate treatment and disposal of domestic and animal waste.

Several of the riparian nations have already carried out water resource management studies and/or environmental strategies and action plans. These activities, aimed at identifying and analysing water resources and environmental degradation at the national level, need to be revisited at the river catchment level.

Due to the large degree of interdependency between the riparian nations, up-stream/down-stream actions and impacts are very much linked. Though Togo and Benin are upstream from Ghana, they suffer the effects of lack of water in Ghana through the link via power generation and supply. Due to long-shore drift and the prevailing direction of coastal currents (west to east), activities in the hinterlands of Togo and Benin also affect their coasts via the discharge and transport of material through the Volta estuary in Ghana. Sahelian countries have significant nomadic populations who move north-south crossing national boundaries in search of fodder and water for their livestock. The identified environmental problems listed in Table 2 vary in intensity both within and between countries. It is this intra- and inter-national variation that is one reason for adopting a basin-wide approach to problem solving, with each nation providing and sharing information and knowledge with other riparian countries.

Table 2. Key environmental problems and their causes in the Volta Basin.

Problem	Cause
Upstream	
Diminishing water resources	Increased demands and increased pollution (which reduce availability or increases the cost of the available polluted waters; altered hydrology from changes in land use which affect runoff/infiltration).
Hydrological changes	Changes in land use which affects runoff and infiltration patterns; sedimentation of canals/rivers which reduces hydraulic efficiency.
Soil erosion	Deforestation; bush-fires; overgrazing; nomadism and human migration; uncontrolled human settlements along river banks the eroded soils resulting in decreased water quality.
Downstream	
Pollution	Dumping of human, domestic and industrial waste into water courses; leaching of agro-chemicals into rivers; salt water intrusion; oil spillage; waste from mining activities; use of agro-chemicals in fishing.
Coastal erosion	The inadequate flow of sediments to the coast due to physical development within the basin.
Coastal pollution	Transport of pollutants to the coastal zone.
Flooding	Uncontrolled spilling from reservoirs; inadequacy/lack of early-warning systems; intense precipitation at short intervals; loss of wetlands.
Basin -wide	
Loss of biodiversity	Deforestation; pollution; over-exploitation of natural resources by humans and their livestock (overgrazing); changes in flow regimes downstream of dams; inundation of reservoir areas; dams as barriers.
Aquatic weeds	The introduction (deliberate in the case of florists, accidental in the case of fishermen and others) of exotic aquatic plants; the problem is exacerbated by increased nutrient availability, which promotes explosive growth, from both organic and inorganic sources.
Water-borne diseases	Creation of dams or impoundments; changes in flow regimes; contamination of water bodies with human waste and pollution; infestation of water bodies with aquatic weeds, habitat for hosts and vectors.
Inadequate / no information dissemination mechanisms	Inadequate resources (financial/human) for information gathering; absence of a regional mechanism for gathering information from member countries.
Inadequate institutional and legal framework for basin management	Lack of an enabling political environment.

4.10 Effets du barrage de Nangbeto sur l'évolution du trait de côte: une analyse prévisionnelle sédimentologique

Adoté Blivi

Résumé :

En vue d'optimiser le rendement hydro-électrique, un second barrage est en projet, à 100 km en aval du barrage de Nangbeto sur le fleuve Mono au Togo. Celui-ci a été mis en service en 1987 à des fins de production d'énergie électrique et de mise en valeur hydro-agricole de la basse vallée. Les travaux de topographie, de bathymétrie et de sédimentologie successifs relatifs au barrage de Nangbeto et à la pré-étude d'impact du second barrage à Adjara ont pour objectif la maîtrise du transport solide dans la vallée et vers la mer, ainsi que des comportements du trait de côte.

Les résultats de terrain montrent que les effets morpho-sédimentaires consécutifs à la mise en service du barrage de Nangbeto ne se sont pas encore répercutés dans la zone côtière.

Cette contribution tente de montrer particulièrement l'impact qu'auraient les effets sédimentologiques sur l'évolution du trait de côte entre le Togo et le Bénin.

Mots clés : Mono, hydro-électrique, topographie, bathymétrie, sédimentologie.

Abstract:

In order to optimize the hydro-electric output on the Mono River in Togo, a second dam is in project 100 km downstream from the Nangbeto dam, which was brought onstream in 1987 for the purposes of producing electric energy and of exploiting hydro-agricultural potentialities of the lower valley. The successive topographic, bathymetric and sedimentologic works pertaining to the Nangbeto dam and to the pre-study of the impact of the second dam at Adjara aim at mastering the solid drain in the valley and towards the sea, as well as the behaviour of the coastline.

The field results show that the morpho-sedimentary effects resulting from the bringing on line of the Nangbeto dam have not yet affected the coastal zone.

This paper attempts to show the impact that the sedimentologic effects would have on the evolution of the coastline between Togo and Benin.

Key words: Mono, hydro-electric, topography, bathymetry, sedimentology.

Introduction

Le Mono est un fleuve dont le cours inférieur est partagé entre le Togo et le Bénin (Figure 1). La réduction de la dépendance énergétique et surtout la croissance des besoins en énergie électrique pour les populations des deux pays ont motivé un programme régional de réalisation de barrages hydro-électriques.

Le premier barrage, mis en service en 1987, est localisé à 35 km à l'est d'Atakpamé sur un site structural de collines résiduelles de 147 m et de 167 m d'altitude encadrant la vallée du fleuve dont le talweg est à 110 m de profondeur. Le site est favorable aux chutes d'eau nécessaires pour le fonctionnement de l'ouvrage et à un lac de retenue d'une superficie de 180 km². Les effets à l'aval de l'ouvrage se manifestent dans le bassin sédimentaire par l'érosion des berges suivie de recoulements de méandres, l'érosion du fond avec transport du débit solide, les débordements des eaux sur la plaine alluviale. Les eaux provoquent des inondations et la dulcification des eaux marines du système lagunaire (Rossi et Blivi 1995; Gnongbo 1998). Le second barrage, en phase de projet, est situé à 100 km en aval de Nangbeto et a fait l'objet de plusieurs études d'impacts dont celles relatives à l'hydrologie et à la sédimentologie (Coyne et Bellier 1992).

De l'analyse des mesures in situ, il se dégage déjà avec le barrage de Nangbeto un nouveau régime hydrologique en concordance avec la gestion des eaux de lâchers. Cette situation sera toujours mise en évidence avec le barrage d'Adjara et sera couplée avec l'élévation du niveau de l'eau dans le fleuve et dans la lagune. Plusieurs séquences sédimentologiques, par le jeu du transport vers l'aval, vont se développer graduellement dans le temps à partir de la retenue, le long du fleuve, près de l'embouchure et se manifesteront également par les variations du trait de côte.

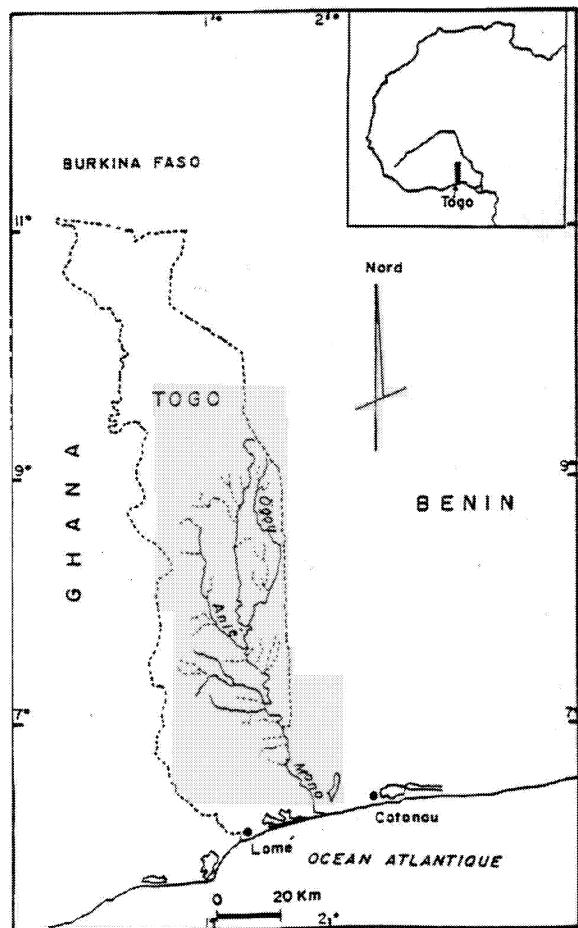


Figure 1. Cours inférieur du Mono entre le Togo et le Bénin.

Cadre géographique du fleuve Mono

Le Mono draine, avec ses principaux affluents Anié, Amou et Kra Ogou, un bassin versant d'une surface de 24 000 km² entre 9°20'N et 6°16'N de latitude et 0°41'E et 1°51'E de longitude (Figure 2). Le relief, d'altitude comprise entre 0 et + 400 m du sud au nord, bénéficie de deux types de climat. Il est établi sur des structures géologiques assez bien différencierées auxquelles correspondent des formations végétales variées de forêts semi-décidues et de savanes guinéennes.

Les données climatiques et hydrologiques

Le 8^{ème} parallèle sépare le bassin du fleuve Mono en deux zones climatiques: au nord, un climat tropical à saisons sèches et pluvieuses avec un total pluviométrique variant entre 1000 et 1300 mm/an et, au sud, un climat de type subéquatorial à quatre saisons dont deux pluvieuses et deux sèches alternées, avec un total de 900 à 1100 mm/an. Sa zone côtière, qui connaît une anomalie climatique, reçoit de 800 à 900 mm/an. Le régime thermique moyen présente une dynamique monotone qui varie entre 24 et 26°C sur l'ensemble du bassin. Les mois de forte chaleur sont février et mars avec des températures de l'ordre de 30°C (Figure 3). Cette situation climatique assez fluctuante le long du bassin, avec des averses de forte intensité à l'origine de quelques rares crues brutales, a de sérieuses répercussions sur le comportement hydrologique et sur les débits du fleuve.

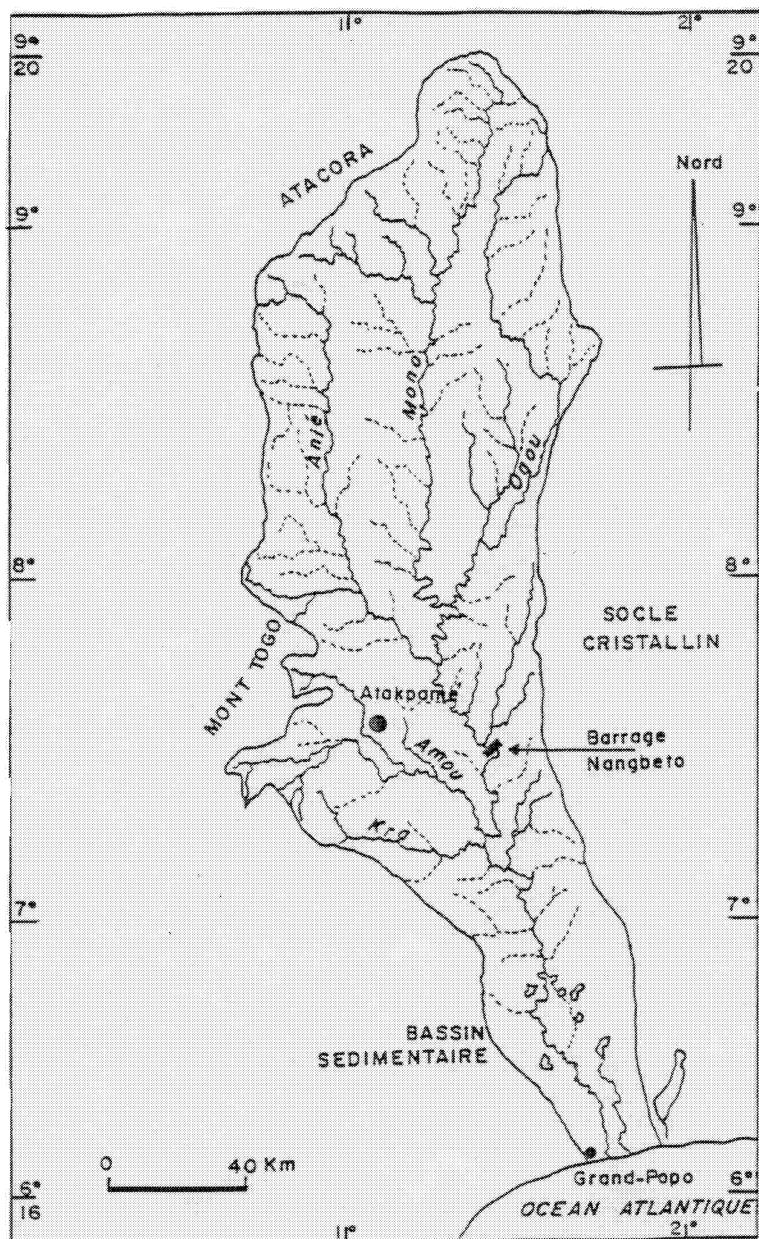


Figure 2. Le bassin hydrographique du Mono.

Les données hydrologiques du fleuve Mono a été complétées par les récents travaux de Klassou (1996) et Gnongbo (1998). Le Mono connaît les forts débits pendant les mois de septembre et octobre, pouvant atteindre 680 à 700 m³/s pour une crue d'année médiane. Les crues décennales portent les débits à 850 m³/s, soit un écoulement d'eau de 40 l/s/km² à Athiémedé. Les étiages, d'une durée de 6 mois, de novembre à avril, présentent des débits à 0,8 m³/s. Avec le barrage de Nangbétéo, les étiages nuls ne sont plus observés puisque le régime hydrologique a changé, portant le débit minimum à 40 m³/s pendant toute l'année (Figure 4). C'est pendant la période de fort débit, correspondant à une forte énergie d'écoulement que s'effectuent les processus de transport (mise en suspension et charriage) des sédiments.

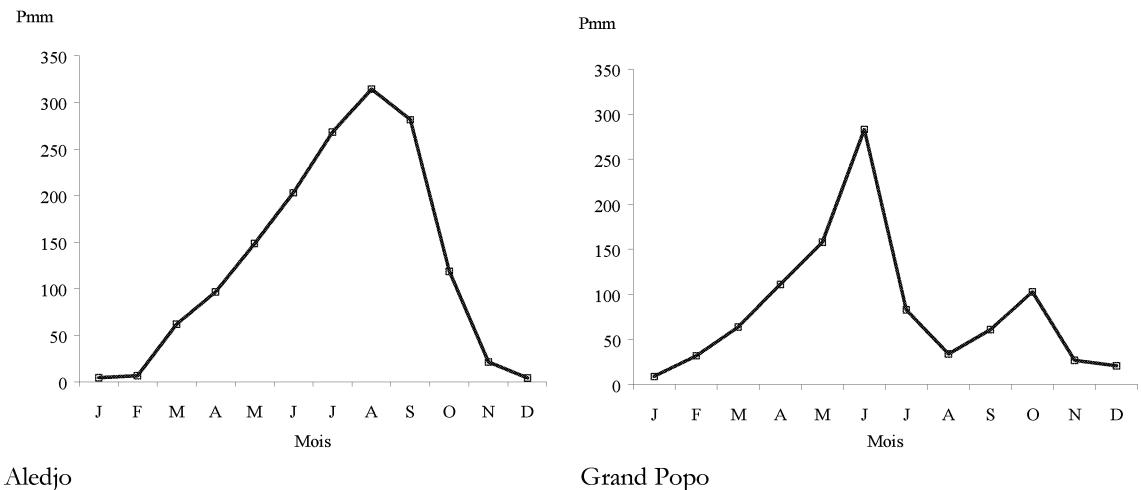


Figure 3. Courbes pluviométriques des stations d'Alédjo et de Grand Popo.

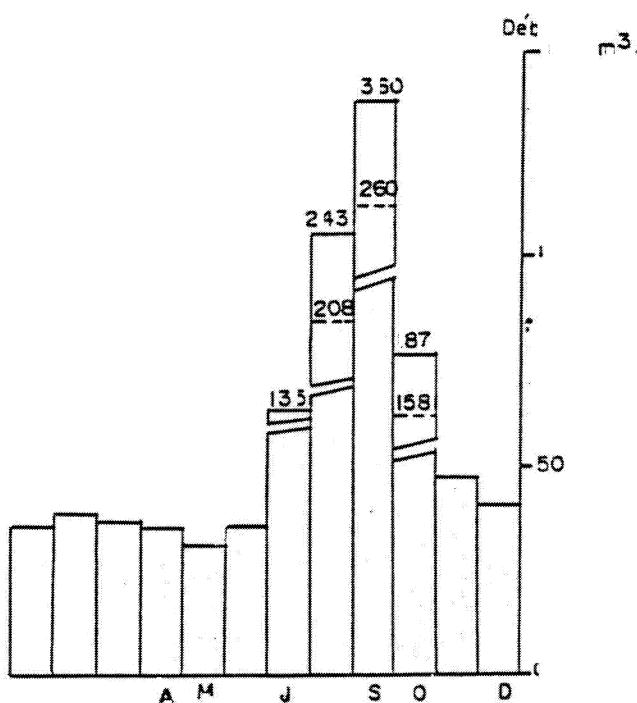


Figure 4. Régime actuel hydrologique du Mono après le barrage de Nangbéto (après Blivi 1998).

Les données géomorphologiques

Dans l'ensemble, le relief se caractérise par une topographie peu complexe, bien différenciée. Il est établi dans un bassin sédimentaire côtier de plaine littorale et de plateau de "Terre de Barre", sur une surface de socle cristallin d'érosion, d'aplanissement et dans une structure de monts constitués de quartzis et de micaschistes dont les altitudes varient entre 400 et 900 m. Cette série morphologique successive montre une disposition structurale le long du fleuve Mono, correspondant aux accidents séparant de longues surfaces subplanes dominées par des séries d'inselbergs granitiques (Rossi et Antoine 1990). Des biefs et des rapides, dont ceux de l'Adjrala, avec une pente de 5% où est prévu le deuxième barrage marquent l'action différentielle de l'érosion sur un substrat lithologique bien varié. Le bassin inférieur, partagé par le Togo et le Bénin, se trouve dans les formations sédimentaires argilo-sableuses avec des pentes médiocres (0,4 à 1,2 m/km).

La configuration topographique donne des valeurs de pente générale assez faible tout au long du fleuve, soit 1% en moyenne, ce qui va influer sur la vitesse d'écoulement et sur le rapport débit/charge. Les réponses morpho-sédimentaires sont sensibles aussi bien dans la géométrie que dans la quantité de matériaux charriés (Rossi et Blivi 1995; Klassou 1996). L'érosion spécifique moyenne est de 60t/km²/an déterminant un apport solide moyen annuel estimé à 950 000 t à Nangbéto. La charge solide est composée de silts, de sables et de graviers dont les diamètres diminuent de l'amont vers l'aval.

Le transport solide du Mono

La fourniture sédimentaire serait de l'ordre de 100 000 m³ de sable par an à la côte. La mise en service du barrage a déclenché une réduction progressive des apports solides du fleuve à la zone côtière.

Les données sédimentologiques

Pendant les campagnes de mesures de 1986 et 1991, les cartes topographiques au 1/50 000^e, les levés topomorphologiques, les reconnaissances et la photointerprétation ont permis d'avoir une approche convenable du phénomène de crue dans la vallée (Université du Bénin, 1991). Le profil en long permet de distinguer des affleurements rocheux de Nangbéto jusqu'à la zone de rapides, puis à l'entrée de la plaine et dans toute la plaine alluviale. Ces secteurs ont été levés et font apparaître des profils monotones et classiques avec des bords élevés représentant des bourrelets de berge.

Les analyses granulométriques, faites à partir de plusieurs centaines d'échantillons, montrent des pourcentages élevés de sable et de silt avec des diamètres caractéristiques de D50-D75 et D90 des sables. Les résultats montrent que tous les échantillons contenant au moins 10 % de silt sont situés en berge, sur les bourrelets ou sur la plaine inondable. Le pourcentage de silt de ces échantillons est de l'ordre de 10 à 95 %, avec une très forte proportion en vallée inondée et une proportion de l'ordre de 30 à 60 % sur les bourrelets de berge. Par contre, presque tous les échantillons de fond ou de plage ne contiennent pas de sédiments fins. C'est ainsi que certains échantillons à forte teneur en silt prélevés dans le lit mineur correspondent tous à des fonds de mares ou à des lits de crue secs au moment des prélèvements. Les autres échantillons, prélevés sur le lit mineur sont formés de sable dont les granulométries décroissent légèrement de l'amont vers l'aval (Figure 5). Cette décroissance, assez légère, est en rapport avec les pentes caractéristiques du lit par grands secteurs géographiques (Tableau 1).

Tableau 1. Diamètres du matériau, pentes et hauteurs de berges.

	PK	Pente m/km	Diamètre (m)	Hauteur (m)
Amont de Nangbéto	225 - 300	0,45	1,5	5
Aval de Nangbéto	145 - 225	0,85	1,3	5
Rapides	130 - 145	5,00	1,2	3
Plaine	40 - 130	0,20	1,0	7
Transition	25 - 40	0,10	0,6	5
Estuaire	0 - 25	0,05	0,3	2,5

Tous les sédiments sableux sont transportés en suspension dans les mêmes conditions qu'à l'amont du barrage. Le diamètre moyen des sédiments du secteur estuaire correspond très sensiblement à celui du matériau du cordon, d'après les précédentes observations et mesures que nous avons effectuées (Université du Bénin 1991).

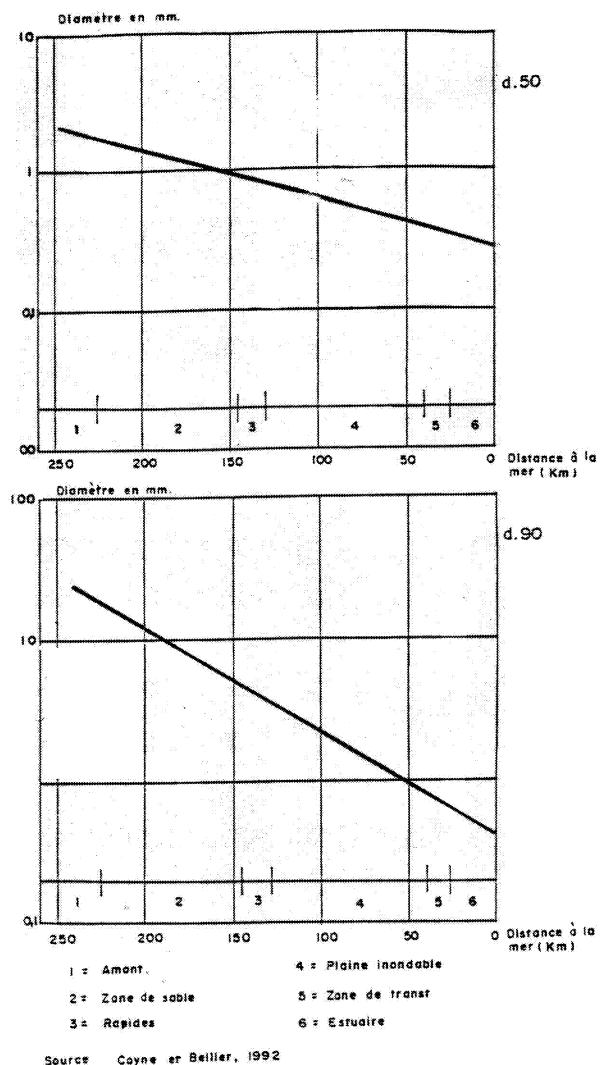


Figure 5. Echelonnement des diamètres de sable le long du fleuve Mono (après Blivi 1998).

Les modalités du transport en aval de l'ouvrage

La capacité de transport solide du fleuve Mono en aval de l'ouvrage est en rapport avec la géométrie du lit, notamment la largeur du lit mobile, la hauteur d'eau, le diamètre du sable, la pente. Dans cette approche, quelques paramètres interviennent dans le calcul du transport : le coefficient de rugosité du fond, le coefficient de rugosité du grain, le débit solide ou la capacité de transport correspondant à la hauteur d'eau et le débit liquide total. Les capacités de transport solide le long du fleuve sont donc fonction des grands secteurs géographiques (amont du barrage, aval du barrage, zone des rapides, aval des rapides et débordement et cours de la plaine) dont les caractéristiques structurales et topographiques diffèrent. La mise en mouvement des matériaux sur le fond est déterminée par un certain débit : le mouvement des sables dans le lit s'effectue dès que le débit atteint 5 à 6 m³/s dans le secteur situé entre l'aval des rapides/débordement et le cours de la plaine. Dans le secteur aval du cours de la plaine, le débit doit varier de 10 à 15 m³/s. Les secteurs n'ont pas ainsi les mêmes capacités de transport.

Les volumes de sédiments écoulés en amont comme en aval sont de 1,8.10⁶ m³/an en moyenne, avec des durées de transit très différentes. Le mécanisme du transport est simple : les crues d'amont apportent le sédiment qui se dépose à l'entrée de la plaine qui est ensuite repris hors période de crue par les débits moyens. D'après les anciennes mesures de l'ORSTOM, les apports solides sont estimés à 950 000 t/an. Par le jeu de transport vers l'estuaire, 100 000 m³/an de sable sont déversés dans la mer. La capacité de transport solide à l'aval de Nangbéto avoisine théoriquement 1 800 000 m³. Toute la charge solide en provenance du bassin est, en l'état naturel des choses, évacuée jusqu'à l'estuaire du Mono.

Impacts des ouvrages sur le transport solide

Le barrage de Nangbéto a apporté des modifications sur la courbe des débits classés journaliers (renforcement des étages, écrêtement des hautes eaux) sans traduire une variation significative de la capacité de transport solide. Le transport s'opère au détriment du fond et des rives sur la partie aval. Comme le volume de sable déposé à l'aval de l'ouvrage est évalué à 8 millions de tonnes et que dans la retenue, il est de l'ordre de 100 à 150,000 tonnes de sable, le stock disponible représente de 40 à 60 ans d'apports solides peu modifiés à l'entrée de la zone estuarienne.

L'effet du projet de barrage d'Adjrala, combiné avec celui de Nangbéto, provoquerait une baisse assez sensible des apports même si le volume disponible entre Nangbéto et Adjrala ne représente qu'une fraction minime du volume sédimentaire total en transit. Le barrage d'Adjrala, localisé à l'entrée de la basse vallée entraînera le piégeage de l'apport sédimentaire des affluents compris entre les deux ouvrages, soit 150 à 200 000 tonnes de sédiments, créant ainsi un déficit d'apport à la côte de l'ordre de 20 000 m³ de sable. L'exploitation du barrage d'Adjrala conduira à une diminution substantielle de la durée du stock sédimentaire à l'aval de l'ouvrage, durée qui ne devrait pas dépasser 30 ans. Au fur et à mesure de la liquidation des sédiments, des érosions de berges apparaîtront nettement et occasionneront graduellement des impacts sur la côte.

Analyse prévisionnelle sédimentologique et évolution du trait de côte

Depuis quelques décennies, la côte du golfe de Guinée est soumise à une violente érosion due à des causes naturelles mais surtout anthropiques (Blivi 1993b; Anthony et Blivi 1999). Les jetées des ports de Lomé et de Cotonou interceptent le volume sédimentaire en transit et provoquent une perturbation des conditions hydrosédimentaires le long de la côte. Ce phénomène se traduit par une plage en progradation et par une plage en érosion. Ces états de plage se caractérisent par une progression successive de trait de côte dans le temps et dans l'espace (CEE 1989; Rossi 1989). Des reculs de l'ordre de 10 m/an sont observés sur 4 à 5 km de côte à l'est du système d'ouvrages maritimes de Cotonou (Figure 6). Par ailleurs, un decul de 5 m/an en moyenne est signalé sur environ 35 km de côte au Togo (Blivi 1993). L'impact du barrage sur les fleuves se remarque à travers la baisse du flux sédimentaire en zone côtière. Il se caractérise par le remodelage et le recul des plages, la fragilité des flèches sableuses (barrières) qui sont déplacées vers la lagune par le jeu des marées.

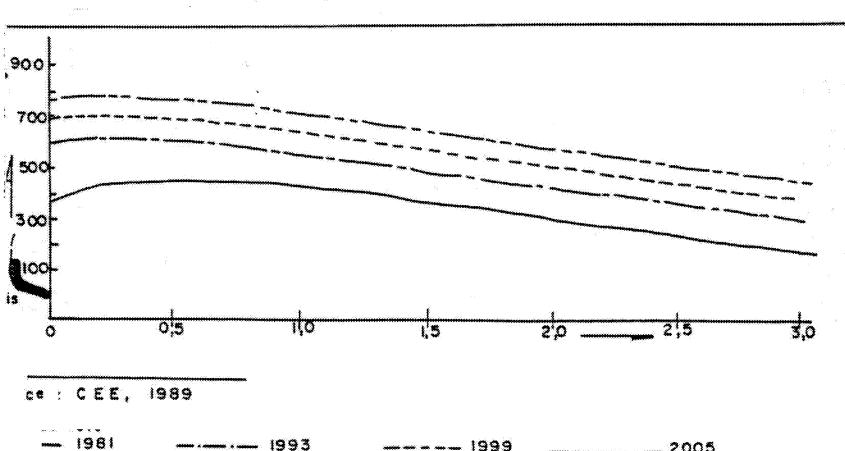


Figure 6. Recul du trait de côte (10m/an) à l'Est de l'épi courbe à Cotonou et prévision à 2005.
(après Blivi 1998).

Dans ces contextes, l'évolution du trait de côte fait l'objet d'une part d'un programme de suivi par levés topographiques de plage pour déterminer la vitesse de recul et les différentes sensibilités de côtes à l'érosion et, d'autre part, d'analyse du bilan sédimentaire fluvial et marin en transit.

La prévision sédimentologique

Dans la mesure où il y a localisation des points d'attaque à la côte et connaissance de la vitesse de déplacement des zones d'érosion, il est possible de prédire à l'avance dans le temps et l'espace les secteurs menacés par l'érosion, d'où la notion de sédimentologie prévisionnelle (Lorin 1984).

L'analyse prévisionnelle se dégage de l'étude du modèle mathématique de l'évolution du littoral entre la frontière togolaise et la région de Ouidah et, par ailleurs, de l'exploitation de deux modèles réduits sédimentologiques qui concernaient la protection de la côte togolaise. Ces modèles ont permis de définir, dans le temps, l'évolution des apports du Mono dans la zone côtière et de simuler la position du trait de côte par rapport à l'érosion et à la sédimentation en fonction de la variation du volume sédimentaire fluvial. L'échelle temporelle considérée est de 25 à 50 ans.

Le modèle est appliqué à une longueur de côte de 50 km à partir de la frontière en considérant que la côte est rectiligne d'après les données physiques issues de documents cartographiques. Dans la réalité, au niveau de l'embouchure, les jeux du mécanisme hydraulique du Mono montrent de faibles variations du trait de côte (avancée et recul) et des déplacements du débouché vers l'Est selon le rapport débit/charge et les flux hydrodynamiques marins. Ces effets mineurs sur le trait de côte justifient le fait que le modèle ait pris en compte une côte rectiligne pour permettre l'analyse.

Avec la mise en service du barrage de Nangbéto depuis 1987, les apports sableux dans la zone côtière initialement de 100 000 m³/an devraient décroître jusqu'à devenir presque nuls (c'est à dire un apport sableux inefficace pour la dynamique sédimentaire côtière) entre 2012 et 2037. Quatre scénarios ont été testés pour simuler la baisse du flux sédimentaire à partir de l'apport naturel initial du Mono : 75 000 m³/an ; 50 000 m³/an ; 25 000 m³/an et 0 m³/an. Ces hypothèses permettent de définir différentes situations, comme la migration de l'embouchure vers l'Est. Dans chaque situation, la simulation de la migration a été évaluée à 1 km tous les 5 ans. Parmi ces tests, la situation vraisemblable à compter de 2012 est celle d'une décroissance des apports de 75 000 à 25 000 m³/an. Cependant, l'analyse prévisionnelle pour chaque situation a été faite par tranche de 5, 10, 15, 20 et 25 ans sur un segment de côte de 50 km (l'embouchure du Mono se situant au PK 33) pour tenir compte de l'importance et de l'influence théorique des apports du Mono. Ceux-ci se caractérisent par des déplacements différentiels du littoral au cours du temps en différents points de la côte.

L'évolution du trait de côte.

A partir de ces situations assez réalistes, une simulation de l'évolution du trait de côte a été effectuée. L'impact direct de la baisse du volume sédimentaire a été mis en évidence sur environ 20 km de part et d'autre de l'embouchure avec des séquences de progradation et de recul. Ces évolutions constatées attestent le comportement hydraulique du fleuve et le volume de sables déversé en mer.

L'érosion côtière autour de l'embouchure rendra très fragile le cordon barrière aura à peine une dizaine de mètres de largeur à partir de 2012. Cependant, son effet ne sera pas ressenti sur la plage de Grand-Popo qui bénéficiera toujours des apports de sables en provenance de l'ouest, notamment de la côte togolaise en érosion. Compte tenu d'une réduction de 100 000 à 25 000 m³/an, le trait de côte reculera de 10 à 12 m. Dans la situation d'une baisse totale des apports, c'est à dire de 100 000 m³/an à 0, le recul atteindra au maximum 20 m au débouché du Mono avec des basculements successifs du cordon barrière sur une dizaine de kilomètres de longueur et des ruptures en plusieurs points très fragiles (Figure 7). Ces évolutions du trait de côte sont très significatives, en ce sens que l'impact du barrage sur le trait de côte est quantitativement confirmé et ce, jusqu'en 2012, où il sera observé et bien mesuré. Dans tous les cas de figure, pendant la période de 25 ans après la construction du premier barrage en 1987, l'effet de l'érosion à l'embouchure due à la réduction sédimentaire restera faible avec des avancées et des reculs moins prononcés autour d'une ligne moyenne. Les dernières observations et levés topographiques réalisés par la direction technique du port de Cotonou, confirme cette évolution du trait de côte depuis 1995. Cependant, les lâchers successifs rendront très actifs les chenaux et provoqueront dans le temps l'érosion des hauts-fonds de la plaine alluviale sur lesquels se trouvent des villages comme Djondji qui risquent de disparaître. Cette instabilité de l'embouchure, aussi bien du Mono que de l'Aného, est bien montrée par l'analyse des données sédimentologiques et surtout hydrologiques tout en précisant que le régime induit par l'exploitation du barrage maintient dans la passe une vitesse importante de l'ordre de 5 m/s. En conséquence, de décembre

à avril, l'embouchure sera marquée par une relative stabilité dynamique. Par contre, pendant le reste de l'année avec une vitesse plus importante, elle connaîtra une forte instabilité accompagnée d'érosions.

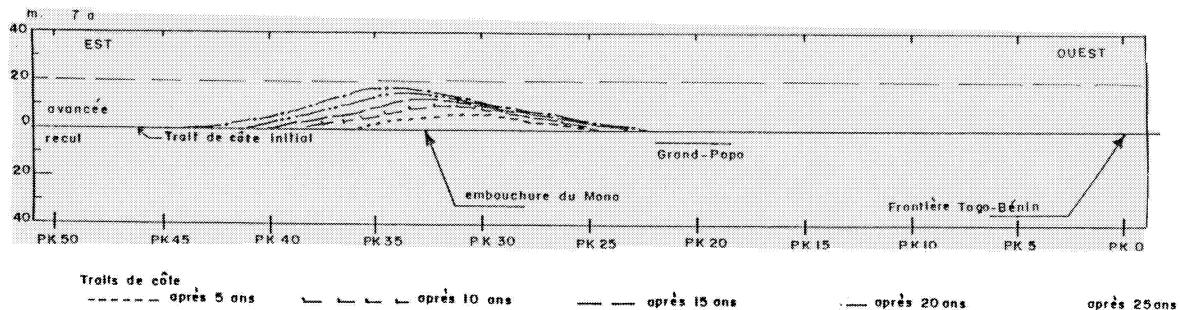


Figure 7a - Apports du Mono ($100\ 000\ m^3/\text{an}$). Situation montrant un apport sédimentaire à l'embouchure avec effet d'accumulation jusqu'à une douzaine de kilomètres à l'Est de l'embouchure.

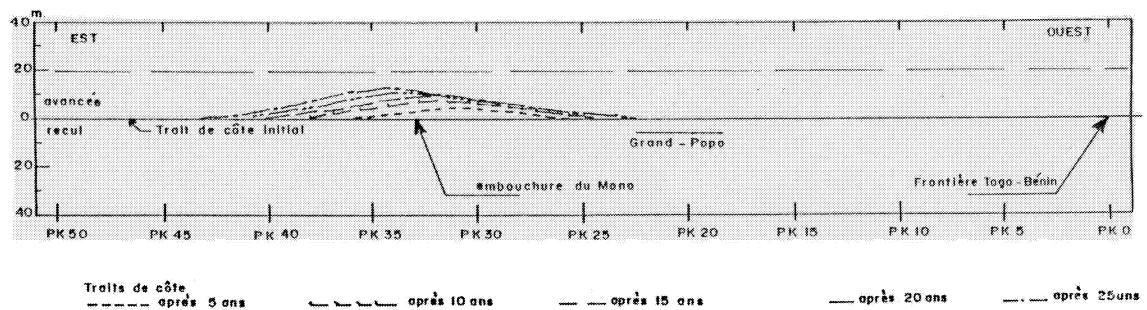


Figure 7b - Apports du Mono ($75\ 000\ m^3/\text{an}$). Situation montrant un apport sédimentaire théorique un peu moins important ; recul du trait de côte.

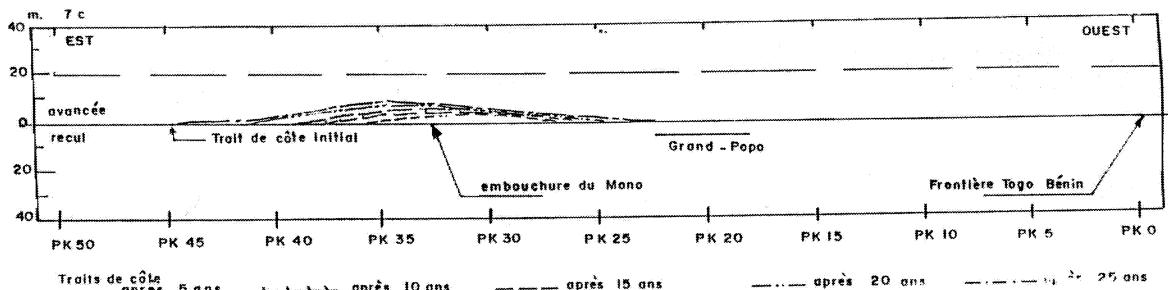


Figure 7c - Apports du Mono ($50\ 000\ m^3/\text{an}$). Situation montrant un apport sédimentaire théorique moins prononcé autour de l'embouchure du Mono ; recul du trait de côte.

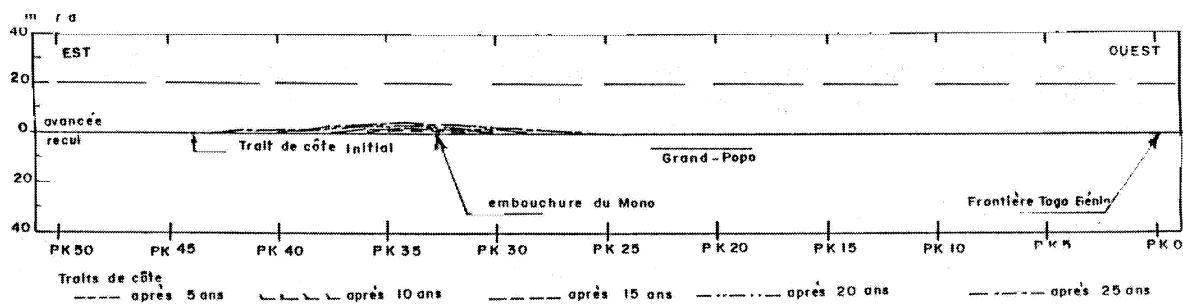


Figure 7d - Apports du Mono ($25\ 000\ m^3/\text{an}$). Situation montrant un apport sédimentaire théorique peu significatif autour de l'embouchure ; recul du trait de côte.

Figure 7. Différents scénarios d'évolution du trait de côte à l'embouchure du Mono (après Blivi 1998).

L'érosion sur la côte togolaise pourra affecter la côte du Bénin sur environ une dizaine de kilomètres après la frontière. Mais, elle ne se combinera pas avec celle provoquée par le barrage sur la côte, dans la zone de l'embouchure. Une zone d'ensablement sur 12 km de côte entre Agoué et Grand Popo sépare les deux zones d'action régressive (Figure 8).

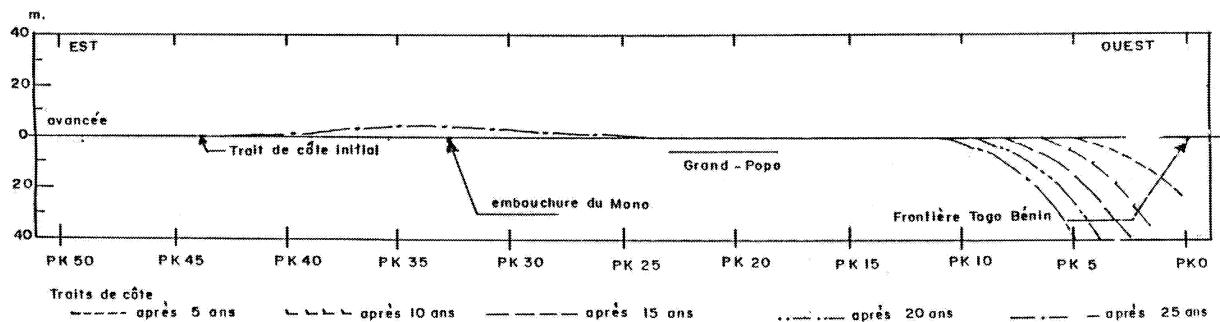


Figure 8. Scénarios d'évolution du trait de côte liés à la réduction du transit sédimentaire à la frontière Togo-Bénin. (après Blivi 1998).

- Apports du Mono à l'embouchure estimés à 25 000 m³/an ; recul du trait de côte
- Transit sédimentaire variant de 1,3 à 0,9 M m³/an ; recul du trait de côte
- Accumulation de sable entre les deux secteurs d'érosion

Conclusion

Les connaissances sur les progressions moyennes annuelles du rivage répondent généralement à des préoccupations relatives à l'aménagement, au développement et à la recherche de solutions en matière de protection. Les conséquences des ouvrages érigés sur les fleuves sont bien connues. Il importe de placer des informations scientifiques à la portée des décideurs pour permettre d'éventuelles actions en vue de limiter les dégradations des différents secteurs côtiers. Des mesures d'adaptation à l'amincissement, au recul, voire à la rupture périodique ou définitive du cordon barrière seront proposées avec l'installation d'ouvrages comme les épis ou les barrages de contrôle de salinité. et à l'ouverture du système lagunaire sur l'océan aux conséquences sociales et économiques graves.

Cette étude de sédimentologie prévisionnelle soulève plusieurs préoccupations dont principalement la mise en place de stations de suivi de l'évolution du trait de côte. Cette opération sera accompagnée d'une carte de sensibilité de la côte à l'érosion à une échelle spatiale figurant un levé tous les 500 m, élaborée pour apprécier les déplacements des points d'érosion et les configurations du rivage. Un suivi de l'influence des eaux marines dans les écosystèmes lagunaires et de mangrove sera également envisagé.

Bibliographie

- Anthony, E. and Blivi, A. 1999 Morphosedimentary evolution of a delta-sourced, drift-aligned sand barrier-lagoon complex, western Bight of Benin. *Marine Geology* **158**:161-176.
- Blivi, A. 1993 Morphology and current dynamics of the coast of Togo. *Geo-Eco-Trop* **17**:25-40.
- Blivi, A. 1993b Géomorphologie et dynamique actuelle du golfe du Bénin (Afrique de l'Ouest). *Thèse de Doctorat. Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3*, 458 pages.
- Blivi, A. 1998 Quelques aspects du beach-rock dans le golfe du Bénin: lecas du Togo. Revue CAMES, série B, vol. 100: 43-56.
- CEE 1989 Erosion côtière dans le golfe du Bénin, aspects nationaux et régionaux. *Rapport d'expertise*, 155 pages.
- Coyne et Belier 1992 Barrage d'Adjara; Etudes d'impacts hydrauliques et sédimentologiques. *Rapport d'études, Université de Bordeaux 3*, 105 pages.

- Gnonbo, T.Y. 1998 Le façonnement actuel du lit du Mono dans sa basse vallée et ses conséquences environnementales à Agbétiko. *Travaux et Recherches Géographiques*, n° spécial, pages 92-107.
- Klassou, S.K. 1996 Evolution climato-hydrologique récente et conséquences sur l'environnement: l'exemple du bassin versant du fleuve Mono (Togo-Bénin). *Thèse de Doctorat, Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3*, 472 pages.
- Lorin, J. 1984 *Recul du trait de côte le long du littoral aquitain. Notion de Séimentologie prévisionnelle. Hydraulique et maîtrise du littoral*. Société Hydrotechnique de France, XVIIIè Journées de l'Hydraulique, Rapport n°6, II.6.1 - II.6.9.
- Rossi, G. et Blivi, A. 1995 Les conséquences des aménagements hydrauliques de la vallée du Mono (Togo-Bénin). Saura-t-on gérer l'avenir? *Cahiers d'Outre-Mer* 48 (192):435-452.
- Rossi, G. et Antoine, Ph. 1990 Impacts hydrologiques et sédimentologiques d'un grand barrage: l'exemple de Nangbéto (Togo-Bénin). *Revue de géomorphologie dynamique* 39 (2):63-77.
- Rossi, G. 1989 L'érosion du littoral dans le golfe du Bénin: un exemple de perturbation d'un équilibre morphodynamique. *Z.Geom.N.F. Suppl.-Bd*,73:139-165.
- Université de Benin 1991 *Barrage d'Adjarala ; Etude hydrologique et sédimentologique sur le Bas Mono et le Lac Ahémé*. Rapport de travaux de terrain, 15 pages et annexes.