

Revue de géographie du Laboratoire Leïd

Dynamiques des territoires et développement



ISSN08512515

N° 10
Déc. 2012

Université Gaston Berger – Sénégal

www.univi.net/rgll
www.laboleidi.com

2000 FCFA

Dynamique naturelle et processus de modélisation de la « brèche » ouverte sur la Langue de Barbarie à Saint-Louis : problématique et préalables méthodologiques*

Mouhamadou Mawloud DIAKHATÉ, Maître de conférences,

Laboratoire Leïdi, UFR de LSH, Université Gaston Berger de Saint-Louis Sénégal

Résumé

La modélisation de la dynamique de la « brèche » s'appuie sur plusieurs données quantitatives et qualitatives, relatives aux éléments biotiques et abiotiques qui caractérisent la LdB. Si l'on peut affirmer, de façon simple, que son évolution est due, principalement, aux effets des vents sur les sédiments déposés sur la plage par la dérive littorale, au travail de sapement effectué sur les berges par les courants marins et fluviaux ; en revanche, on est peu édifié sur les rythmes et processus d'évolution induits par la double hydrodynamique marine et fluviale particulière de cette zone estuarienne, ou encore dans une mesure plus spécifique, sur le transport des sédiments par la dérive littorale soumis aux effets locaux du changement climatique. D'où, le présent essai pour tenter de saisir toute la dimension d'une dynamique complexe.

Abstract

The modelisation of the dynamic of the “brèche” depends on many quantitative and qualitative data, relation to biotic and abiotic elements which characterize the LdB. If we want to affirm in a simple way that its relation is mainly due to wind effects on the sediments deposited on the shore by ocean currents which leads to the slow erosion affecting the ... by sea and river currents; on the contrary, we are not well inform about the reason and the evolutionary process induce by the sea and river hydrodynamic specially in this estuary, or further in a more specific manner on the sediment movement of littoral currents subjected to local effects of climatic change. That is why this essay tries to cover all the dynamic complexity of the topic.

Mots clés : Langue de Barbarie, dynamique naturelle, brèche, hydrodynamique, modélisation

Key words : Langue de barbarie, natural dynamic, « brèche », hydrodynamic, modelisation

1. Introduction

De Saint-Louis à Taré, son ancienne embouchure, la branche principale du fleuve Sénégal n'était séparée de l'océan Atlantique que par une mince bande de sable d'une longueur d'environ 40 km et d'une largeur décroissante du nord au Sud d'environ 400 à 200 m : la Langue de Barbarie (LdB). Orientée Nord-Sud, cette flèche littorale comprend trois segments selon la classification de SALL M. (1982) :

- un segment proximal qui s'étend depuis la racine de la flèche à quelques 3 km au Nord de Saint-Louis jusqu'à l'hydrobase avec une pente moyenne de l'ordre de 3 à 4 % ;
- un segment médian de l'hydrobase à la hauteur de Tassinère, la pente à cet endroit est très accentué, sa valeur est située entre 4 et 6 % pour un estran de moins de 50 m de large ;
- un segment distal de Tassinère à l'extrémité de la flèche, là la pente s'adoucit et descend en dessous de 3 %.

La LdB est donc une bande de terre fragile et instable qui sépare l'île de Saint-Louis à l'océan Atlantique, constituant une sorte de digue de protection de la ville. Telle que nous la connaissons de nos jours, la LdB est le résultat d'un long processus alternatif d'engraissement et de démaigrissement de la plage par la dérive littorale mais aussi, par le remaniement éolien des dunes bordières atténué par quelques peuplements de *Casuarina equisetifolia* et de salicornes, sous l'influence directe des écoulements interactifs et rétroactifs des eaux de crue et des eaux marines diffractées dans l'estuaire (figure 1).

En effet, la distribution d'une partie de la charge sédimentaire, par la dérive littorale, engraisse la plage qui à son extrémité s'étire, décrivant une boucle orientée Nord-Est Sud-Ouest. Le transit sédimentaire a été estimé en moyenne entre 600 000 à 1 000 000 m³/an (BBL/SW, 1985 ; KANE A., 1997). Étant donné la faiblesse du marnage -compris entre 0,50 et 1,40 m-, l'estran atteint rarement 100 m mais, varie en fonction de l'efficacité des apports ou prélèvements de sédiments. Les micro-formes et leurs profils en travers sont régulièrement attaqués par les houles Ouest-Nord à Nord-Ouest jusqu'à leur érosion complète (SALL M., idem). Il s'en suit que le rétrécissement de la largeur du segment médian induit par le recul du rivage externe, insuffisamment compensé par l'alluvionnement du rivage interne, crée des zones de flexion (baies) que les forces perpendiculaires des houles de marée haute et de tempête, ainsi que les eaux de crue du fleuve rompent, occasionnellement, dans les parties basses. En période de fortes houles, les courants d'arrachement ou *rip-currents* sapent intensément le cordon littoral, créant de profonds rentrants qui affaiblissent la flèche qui finit par se rompre, par endroits. À la faveur du retour à l'accalmie des vagues, la dérive littorale arrive à colmater les brèches naturelles, par l'important apport de sable. Ce phénomène a été noté pour la dernière fois en avril 1975.

Mais, ce qui s'est passé dans la nuit du 3 au 4 octobre 2003 est d'une toute autre nature. Les autorités publiques du Sénégal ont décidé, au plus haut niveau, du percement d'un « canal de délestage » sur la LdB au niveau du segment médian, à 7 km des faubourgs Sud de la ville. Large de 4 m, long de 100 m pour une profondeur de 1.50 m à l'origine, l'ouvrage réalisé avait un objectif social immédiat à savoir « sauver Saint-Louis des eaux », ville dont aucune côte d'altitude ne dépasse 2, 50 m au dessous du zéro IGN. Il faut dire que la récurrence des inondations caractérise la ville de Saint-Louis. Les débordements des eaux de la crue du fleuve ont largement alimenté les récits coloniaux (J. DE ROCHEFORT, 1637 ; LE MAIRE, 1683 ; Maréchal GALLIENI, 1879 ; Colonel FREY, 1890 ; in DIAKHATÉ M., 1988). Et, la mémoire collective des habitants de la ville garde encore intact le souvenir des grandes crues

du vingtième siècle à savoir celles de 1906, 1922, 1924, 1935, 1936, 1950, et surtout celles plus récentes de 1994 et 1999.

Aujourd'hui, la brèche, ouvrage de génie civil controversé pour ses impacts inattendus et incontrôlés, après le passage du trop-plein du fleuve Sénégal en crue qui menaçait, alors, de submerger la ville de Saint-Louis, la dite brèche est devenue au fil des années une véritable embouchure suite à la fermeture de Taré. Elle soulève, aujourd'hui, plusieurs interrogations d'ordre écologique, économique et social. Il s'agit de (re) connaître la nouvelle dynamique physique de cet espace de vie exceptionnel qui demeure le site de toutes les activités liées à la pêche et les conséquences économiques et sociales qu'elle induit en termes de sécurisation des investissements hôteliers et des habitats traditionnels de Guet Ndar et Santhiaba.

2. Attendus méthodologiques

L'approche « multi-agents » qui nous inspire pour poser les termes de la modélisation de la brèche est, en partie, inspirée des travaux de Dembélé sur l'application à l'érosion côtière de la modélisation multi-agents de systèmes physiques de J. M. DEMBÉLÉ (2006), de travaux sur l'adaptation de schémas de subdivision pour la reconstruction d'objet sans artefact de François DESTELLE (2010) et plus généralement des travaux de l'IFREMER sur la question. Elle pose toute la difficulté de la modélisation du phénomène de l'érosion côtière, notamment, en raison de la nature complexe du système morphologie considéré et mais aussi de l'efficacité des méthodes de monitoring utilisées (2D/3D) sur des transects précis pendant des séquences temporelles caractéristiques.

L'autre difficulté est que les mesures quantitatives qui répondent aux critères mathématiques « présence-absence » ou à un « rangement » peuvent être traitées par la statistique non paramétrique ou multicritère. Alors, la question fondamentale à la base de notre réflexion est : comment s'effectue le traitement et la transformation des données à représenter ? En filigrane, se pose aussi le problème des interpolations spatiales c'est-à-dire trouver une fonction qui soit susceptible de représenter, selon la convention retenue, une surface à travers un semis de points astronomiques (est, ouest, nord, sud, longitude, latitude, parallèle, méridien) et de paramètres qualitatifs (états du fleuve, formes des cuvettes, évolution des dunes, etc.) et quantitatifs observés (états du peuplement humain, formes habitat, conséquences des activités économiques, impacts des infrastructures et équipements, etc.).

Nous le notons bien, la relation de l'événement par la représentation (ou la carte) n'est pas d'une simplicité mathématique. D'ailleurs et malheureusement, la géographie fait l'impasse sur de nombreux phénomènes naturels qu'elle ne parvient pas à localiser et à représenter spatialement. C'est le cas de la spatialisation du transport de sédiment par un cours d'eau ou par exemple, dans un autre registre, la circonscription de zones aérologiques pollués, même si elle en fait, avec exactitude, la description.

D'ailleurs, pour mieux comprendre toutes les difficultés du géographe à spatialiser un objet, tentons ensemble un jeu en faisant appel à votre imagination : nous sommes plusieurs individus au bord du fleuve Sénégal dans sa partie estuarienne, lançons y chacun un objet

flottant identique pour tous et demandez-vous où il sera dans une heure ? Toujours à la même place de jet, prisonnier d'un tourbillon ou très en aval ? Ou sera-t-il très en amont compte tenu des courants contraires induits par l'ingression des eaux marines ou peut être transporté sur l'autre rive, ou encore ballotté par une série de contre-courants ? Vous en conviendrez, aucune équation ne peut nous aider à prévoir la réponse. Encore moins de dessiner la trajectoire de l'objet flottant, d'autant que les uns l'auront lancé plus à gauche ou plus à droite, plus loin ou plus près du point de jet ! La différence des jets, même infime, se verra amplifiée au cours du trajet. En résumé, on pourrait établir un modèle moyen, résultat d'un « bricolage » mathématique pour déterminer la trajectoire idéale. Nous disons bien idéale et non réelle. Avec une certaine dérision, nous soulignons que des équations peuvent permettre de calculer avec une précision extrême des coordonnées d'une sonde lancée dans l'espace entre les planètes. Mais, elles seront encore inaptes, pour le moment, à établir l'évolution des coordonnées de pollens d'un groupement végétal qui iront féconder un groupement voisin !

Certes, les méthodes d'investigation de la géographie ont évolué avec le développement des technologies de détection (télédétection) et d'organisation de l'information (système d'information). Il faut noter, d'ailleurs, que l'apport de la télédétection c'est-à-dire l'information satellitaire et l'usage de puissants logiciels d'analyse spatiale permettent de réduire les effets du « chaos déterministe » auquel nous sommes fatalement confrontés en expérimentant un modèle. Chaos, parce qu'on ne sait pas tout ce qui va se passer, malgré la connaissance que nous avons de toutes les données qui déterminent les événements. Déterministe, parce que des effets objectifs et précisément mesurables et repérables déterminent la suite des événements. Et du chaos déterministe, on finit par s'apercevoir que cela « fourmille » dans la nature. Les mouvements de l'eau ou de l'air, par exemple, sont dans bien des situations très chaotiques.

3. Problématisation et analyse

La LdB, dans le quotidien des habitants de la ville de Saint-Louis, est devenue quasiment une image mentale, un espace cognitif qui n'est plus strictement euclidien. De plus en plus, en géographie de la perception et de la cognition, les échelles de mesure non quantitatives (qui abandonnent la métrique euclidienne au profit des techniques non paramétriques comme l'usage d'anamorphoses et de cartogrammes) témoignent de l'évolution de la discipline qui se nourrit, de plus en plus, des mathématiques.

1. Éléments de compréhension de l'évolution naturelle de la LdB : une morphodynamique sous influence

L'évolution naturelle de la LdB dépend, à la fois, de l'état du bassin du fleuve Sénégal et du transport sédimentaire des eaux de l'océan Atlantique. Les apports terrigènes et sédimentaires modèlent la structure de ce composant essentiel de l'estuaire qui se caractérise par une grande instabilité.

Aperçu sur la morphodynamique naturelle de la LdB

La vitesse de l’allongement de la flèche littorale a constamment varié dans le temps sans être pour autant de type cyclique. Les phases de fort accroissement - de 1913 à 1950 la vitesse a été de 400 m/an – ont alterné avec des phases d’accroissement moins forts – de 1890 à 1913, la vitesse a été de 350 m/an – ou encore des phases de relative stagnation – la LdB se trouverait actuellement à sa limite d’extension maximale-

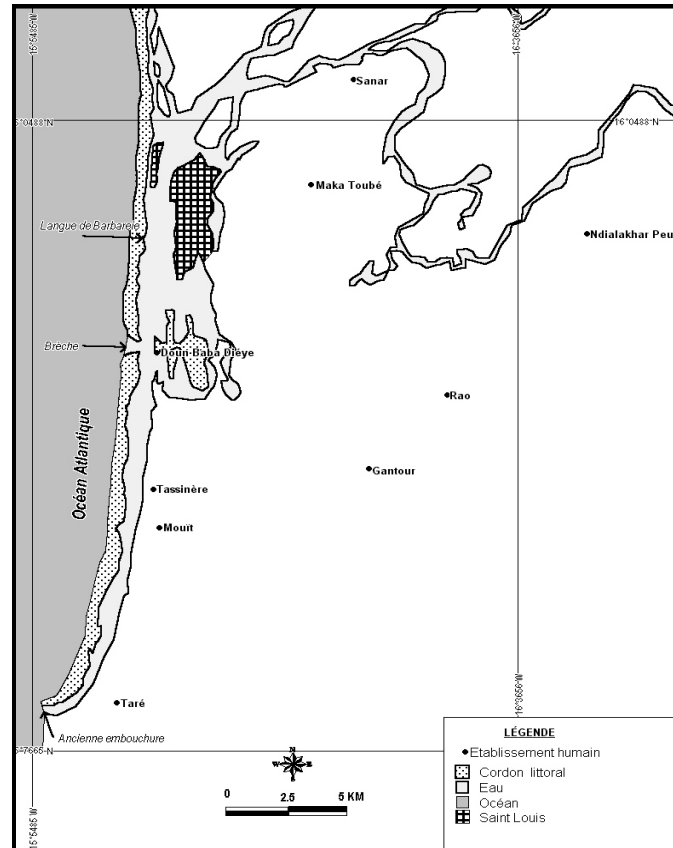


Figure 1. Croquis de localisation de la brèche sur la Langue de Barbarie (SY B. 2008)

Il est important de noter qu’après chaque rupture, on observe pendant un certain temps la co-existence de deux embouchures à travers la LdB. La nouvelle située, le plus souvent au niveau du segment médian, est généralement plus vive. Tandis que l’ancienne se referme totalement, créant une lagune car, la pointe distale se raccorde au continent. Le fleuve retrouve ainsi une seule embouchure.

Naturellement, l’évolution de la LdB obéit à un processus de double alimentation par transport naturel de matériaux marins pour ce qui concerne sa face Atlantique et de sédiments d’origine fluvial pour sa face opposée. Les deux modes d’alimentation étant marqués par des phases plus ou moins actives en fonction de la densité de la marée et de l’état du fleuve. Au demeurant, l’évolution de la LdB semble être commandée par les effets de la cinétique des matériaux marins sur sa face Atlantique.

Le transport des sables et graviers sur la LdB peut être schématisé ainsi (figure 1) :

- le mouvement orbital de la houle, ainsi que les courants, soulèvent les sédiments ;
- les courants (de marée, de houle et de densité) et l'asymétrie éventuelle du mouvement orbital de houle transportent les sédiments grossiers par charriage (ils roulent sur le fond) et les sédiments fins en suspension. Le charriage est favorisé dans le sens de la pente.

Il y a ainsi transport sédimentaire des zones de forte mobilisation sédimentaire vers celles de faible mobilisation, souvent dans la direction des courants, voire dans la direction de la pente ou de la propagation de la houle.

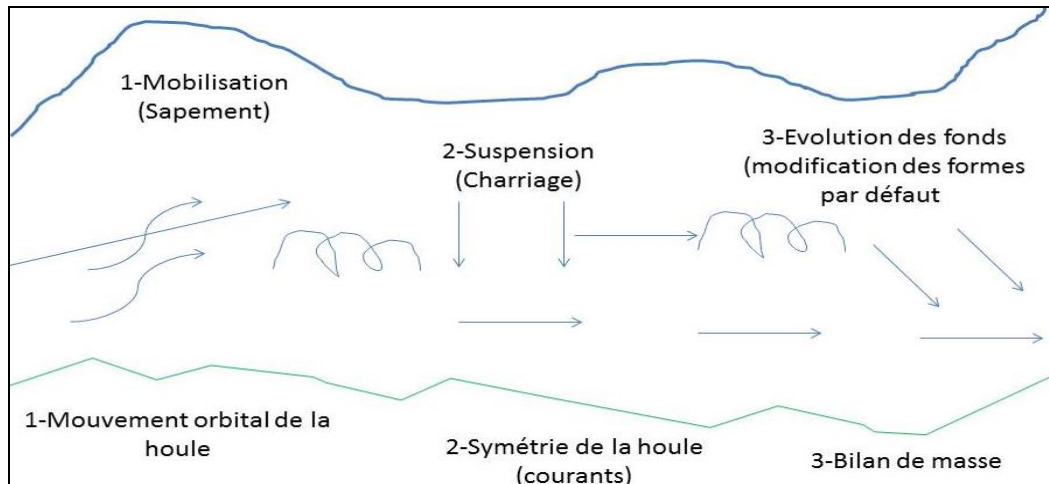


Figure 2. Schéma de transport sédimentaire naturel sur la Langue de Barbarie

Le transport sédimentaire naturel sur la LdB est essentiellement tributaire du double impact de l'action des courants de marée et du mouvement orbital de la houle lorsque cette dernière a une incidence oblique.

Le rôle de la marée

- La marée induit les courants de marée, périodiques, de quelques dm/s au niveau de l'estuaire ;
- elle induit surtout une variation périodique de la hauteur d'eau, ce qui influe sur la propagation et la déformation de la houle.

Le rôle de la houle

La houle s'affirme par un mouvement orbital qui :

- s'ajoute de façon non-linéaire aux courants pour mobiliser les sédiments du fond. Cette action est accentuée près de la côte par l'asymétrie verticale de la houle notamment sur les zones abruptes et les flancs arrière doux ;
- crée une agitation de l'eau qui maintient en suspension les sédiments ;

- induit un transport sédimentaire dans le sens de propagation de la houle, si elle est asymétrique horizontalement c'est-à-dire lorsque les crêtes sont élargies ou les creux plats.

Il faut noter qu'à cet endroit de la nouvelle embouchure, le rouleau de déferlement et sa dissipation induisent une turbulence supplémentaire qui mobilise et maintient en suspension les sédiments. Les courants classiques y sont notés, à savoir :

- le courant littoral quand la houle a une incidence oblique, ou que sur le long du littoral, la hauteur de la houle varie c'est-à-dire qu'il y a des différences de "set-up" (figure 2) ;
- le courant du large vers la côte initié par le déferlement et par l'asymétrie horizontale de la houle ;
- le courant de retour qui compense le précédent. Les courants de retour de houle peuvent être localisés : ils forment alors des croissants de plages ou creusent des cuvettes allongées. Mais, ces formes sont pour la plupart très évanescentes (figure 3).

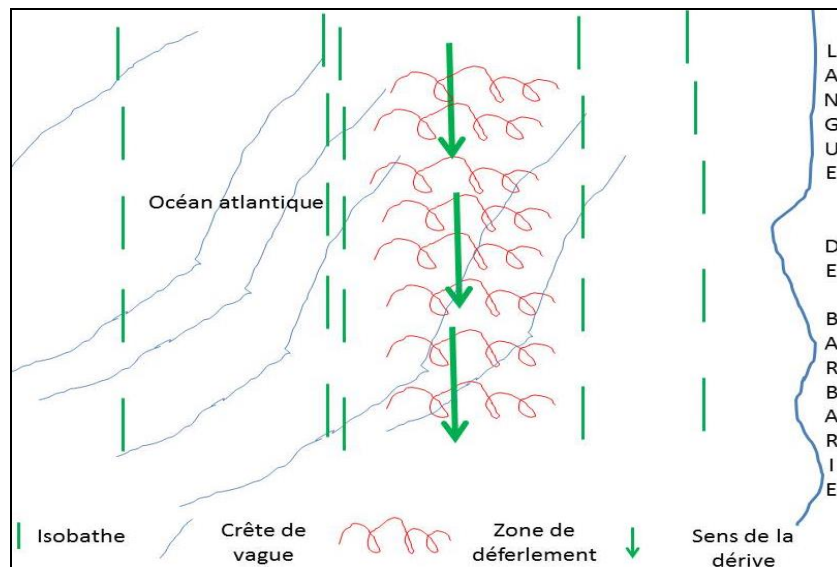


Figure 3. Schéma du courant littoral de houle

Le courant littoral de houle peut être considéré comme l'agent principal du façonnement de la LdB et à ce titre, son impact sur l'évolution de la nouvelle embouchure est une évidence. D'ailleurs, la formation rapide de formes évanescentes comme les croissants de plage atteste, s'il en était besoin, de l'ampleur du travail attesté par les effets d'incidence de la houle. L'élargissement de la brèche initiale en est le résultat le plus probant (nous y reviendrons plus bas).

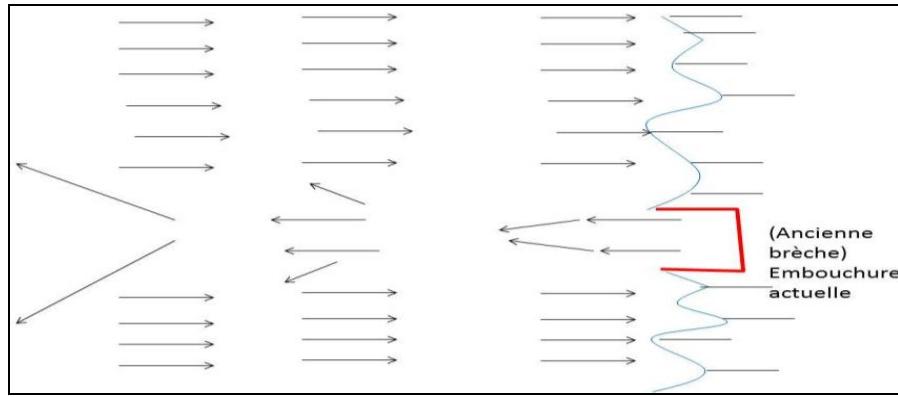


Figure 4. Formation de croissants de plage sur la Langue de barbarie

2. Des effets d'impact du barrage de Diama : vers une nouvelle morphodynamique

Depuis plus de 30 ans, la LdB n'a pas connu de ruptures naturelles. On serait tenté d'imputer cet état de fait aux effets des nouveaux aménagements hydrauliques sur le fleuve Sénégal. En effet, la mise en eau des barrages de Diama (1986) et de Manantali (1988) détermine, depuis lors, le schéma de l'évolution morphodynamique du bief estuarien. L'artificialisation du fleuve Sénégal modifie les facteurs physiques de l'écoulement alterné des eaux estuariennes : l'ingression des eaux marines est contenue par le barrage de Diama, au moins pendant les huit mois de saison sèche. Ce qui n'autorise le brassage entre les eaux douces fluviales et les eaux marines salées que lors des lâchers commandés par les contraintes de la gestion intégrée des barrages (UDA T., AGEMORI C., CHUJO N., 1986).

Ainsi, l'hydrodynamique du bas estuaire est influencée d'une part, par les coefficients de marée et, d'autre part par l'impact des lâchers de la gestion intégrée des barrages. Des mesures effectuées par la Société de gestion du barrage de Diama (SOGED) lors de lâchers du barrage en fin d'étiage (juillet, 1991) et en situation de crue (septembre, 1991) montrent que l'amplitude de marée n'a pas dépassé 0.50 m, ce qui s'explique dit-elle « par un marnage assez faible sur la côte sénégalaise, variant entre 0.50 m et 1.40 m ». La SOGED note, en quintessence, que « pour un débit d'environ 120 m³/s, l'onde créée par l'ouverture du barrage de Diama met environ 6 heures pour atteindre le village de Gandiole ». Et que, « au cours des différentes missions, le niveau d'eau a été mesuré et un décalage dans le temps entre la marée dynamique et les hauteurs d'eau se traduit à basse mer par une étale de niveau précédent l'étales de courant d'environ 1 heure, tandis qu'en pleine mer, l'étales de niveau suit l'étales de courant d'environ 1 heure ». Ce phénomène est, d'ailleurs, commun à tous les estuaires.

La charge sédimentaire du fleuve Sénégal est, pratiquement, visible sur toutes les images satellitaires ; l'interprétation de sa variabilité saisonnière est tout aussi aisée (A. KANE, 1985) : pendant la saison des pluies, donc saison de crue, les eaux du fleuve, de couleur jaune-ocre, sont extrêmement turbides en raison de leur charge en limons. Le transport solide est élevé, au niveau du pont Faidherbe de la ville de Saint-Louis, dès 10 cm de profondeur, le disque de Secchi disparaît. Les sédiments et alluvions fluviales provenant de la moyenne et haute vallée du fleuve Sénégal, stockés dans la zone amont de la retenue, sont brutalement libérés par l'« effet de chasse » que provoque l'ouverture des vannes du barrage de Diama.

Dès la fin de la saison des pluies et, après la fermeture des vannes du barrage de Diama, l'ingression des eaux marines reprend sous l'effet de l'onde de marée. Les eaux douces qui occupaient jusqu'alors le bief estuarien sont, progressivement, diluées : le passage de la couleur des eaux de jaune-ocre à bleu-sombre en atteste. En effet, dès le mois d'octobre, les charges solides des eaux diminuent réduisant, dans le même temps, leur turbidité même avec la restitution au fleuve des eaux d'inondations du lit majeur, des eaux d'infiltration et de vidange des nappes. Les concentrations de matières en suspension diminuent et sont comprises entre 20 mg/l et 50 mg/l.

Les plus fortes concentrations journalières observées par A. KANE (1993) au cours de deux cycles successifs de crue artificielle sont de « 740.6 mg/l le 1 septembre 1989 et de 378.9 mg/l le 30 août 1990 ». Ces valeurs remarque A. KANE « sont élevées, comparées à celles enregistrées à Saint-Louis (686.4 mg/l) le 15 août 1981 et (415.8 mg/l) le 20 août 1982 ». Selon nos propres mesures effectuées à Bop Thior, le 5 Août 2000, la crue artificielle a entraîné des concentrations de 676.7 mg/l et, le 29 du même mois des concentrations de 342.9 mg/l. Le barrage de Diama constitue un piège à sédiments pour la partie située en amont de l'ouvrage, la partie en aval est quant à elle soumise au transport de matériaux minéraux d'origine marine, à tout le moins, dans la zone proche de l'embouchure et d'éléments divers surnageant.

D'une manière générale, le schéma avant barrages n'est que, légèrement, modifié : l'évolution saisonnière montre une augmentation rapide des matières en suspension contenues dans les eaux estuariennes avec l'arrivée de la crue annuelle. J. Y. GAC et A. KANE, (1986) font remarquer que « les variations de la charge solide sont importantes et rapides : elles dépendent de la force érosive des averses, de la reprise des laisses de crue, et donc de l'état du bassin à la suite des pluies précédentes ». Mais qu'en est-il de l'influence de la charge turbide sur l'évolution de la LdB ?

Effets probable du creusement de la brèche sur le littoral

En règle générale, par forte houle (tempêtes d'hivernage), la houle déferle loin de la côte, il y a érosion de la plage. Par faible houle, la houle déferle en haut de plage, il y a réalimentation de la partie médiane de la plage. Il y a parfois formation d'une ou plusieurs barres de sable dans la zone de déferlement. Cependant, le creusement de la brèche semble avoir produit deux effets :

- localement, le creusement modifie la houle, si le site d'extraction est au large du déferlement, le creusement y atténuera la houle. Sinon, le creusement y accentuera la houle ;
- le creusement modifie les courants, si ledit creusement atténue le courant au centre du site d'extraction, et l'accélère en ses coins. Cependant, si le site d'extraction est allongé dans la direction du courant et de grande taille devant la profondeur d'eau, le courant sera canalisé, c'est-à-dire accéléré au centre du site (KLEIN, 1999).

Faute d'avoir effectué une véritable reconnaissance dans une zone jugée « dangereuse » par les piroguiers qui nous ont accompagnés, nous nous contenterons de donner le schéma théorique d'évolution de la plage après la mise en œuvre d'un ouvrage de génie civil similaire à la « brèche », à tout le moins dans ses premières semaines d'existence : dans le cas fréquent d'une souille peu étendue, située au large du déferlement, si elle est dans une zone active de transport sédimentaire journalier (marée), saisonnier ou continu, elle piègera des sédiments (figure 5).

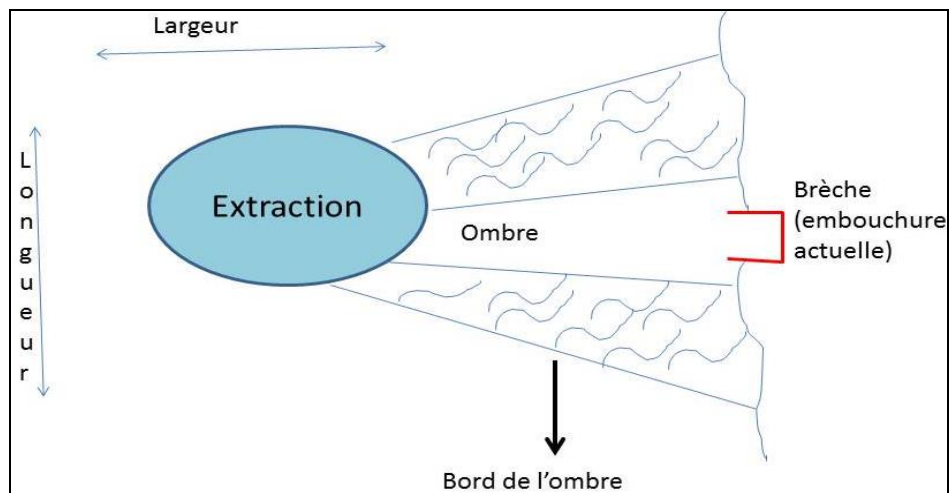


Figure 5. Schéma de creusement probable de la brèche

Les **effets de la brèche sur les matériaux marins** devront être précisés par les scientifiques concernés (géomorphologues et océanographes). Cependant, nous pouvons affirmer que jusqu'à une certaine limite, le creusement modifie la houle par réfraction. Deux situations sont alors plausibles, soit (HILTON M.J., HESP P., 1996) :

- la houle est diminuée dans l'ombre du site d'extraction ;
- la houle est accentuée de part et d'autre de cette ombre.

Rôle des paramètres morphodynamiques

Le rôle qualitatif de chacun des paramètres pris séparément est connu. Ainsi, l'influence d'une extraction quelconque sur un littoral, *a fortiori* une brèche, sera accentuée dans les cas suivants (ARMÈDE R., 1999) :

- le site d'extraction est sous une faible hauteur d'eau, proche de la côte, large, volumineux ;
- le littoral, du site d'extraction jusqu'à la côte, est caractérisé par :
 - o des houles de grande amplitude, de longue période, de faible étalement directionnel,
 - o des courants importants (de marée, de houle, de densité),
 - o des sédiments marins mobilisables en abondance et de petite taille.

Ces paramètres morphodynamiques sont interdépendants. Cependant, les propriétés des sédiments sont largement connues (SY B. 2008) et dépendent du contexte géologique du quaternaire qui a marqué le modelé de l'estuaire du fleuve Sénégal par la nature de son substrat et par les apports fluviaux. À cela, il faudrait aussi ajouter le régime de houle et courants : en un site aussi caractéristique que la LdB, la houle et les courants déterminent le tri des sédiments seront *de facto* plus ou moins grossiers. Pour connaître l'effet d'une variation simultanée d'un ou de plusieurs paramètres, il faut quantifier le rôle de chacun, ou recourir aux observations.

4. Résultats

Des observations que nous avons effectuées sur le site, à proximité de l'Hôtel « Cap Sud » situé sur la partie Nord de la « brèche ») donnent les résultats qui suivent. Il s'agit d'un suivi de sept ans (2003-2010) des phénomènes observables à l'œil nu. Nous voudrions signaler que les stations témoins que nous avons plantées ont été victimes de la furie des vagues qui accompagnent les marées. Il faut dire aussi que la volonté nous a manqué de reprendre un travail à la Sisyphe. Donc, le commentaire qui suit est davantage empirique que scientifique. Nous avons constaté dans la partie occidentale (côté océan) un léger déplacement de la masse sableuse vers le nord (environ 1m/an), dans la partie orientale (côté fleuve) un très léger comblement de vase par endroits, dans les zones les plus basses, d'une vitesse estimée entre - 1 et 2.5 cm/an. Dans la partie orientale de la masse sableuse, des surcreusements de 3 à 5 m peuvent être notés induisant un ralentissement des courants ; parallèlement, aucun comblement n'est noté dans la partie occidentale qui est aussi surcreusée de plus de 5 m. Ce qui donne une forte impression de « chenalisation » des courants sans effet, cependant pour le moment, sur le profil général de la LdB dans son segment proximal. Dans cette zone Nord, les courants de marée sont tournants, en vive-eau ils varient de 0,05 m/s vers le Nord à 0.50 m/s vers le SSW, 0.90 m/s vers l'Ouest. Exactement à ce niveau, les houles moyennes sont de hauteur 0.4 m et de période 7 s, les houles de tempête d'hivernage peuvent atteindre 6 m de hauteur et 2 s de période.

Pour des raisons liées à la sécurité des étudiants de Master 1 qui nous ont accompagnés, nous n'avons pu mesurer le travail qualitatif du sapement de la masse sableuse par les vagues car, certains indicateurs n'ont pu être physiquement obtenus comme les hauteurs d'eau, les hauteurs de houle, la direction des courants qui renseignent sur la profondeur ou le comblement de souille. Ainsi, nous ne pouvons rien soutenir sur la granulométrie, les pentes des fonds et la charge réelle des courants d'où notre mutisme à propos de l'arasement de bancs sableux, par exemple.

Essai de modélisation mathématique : préalables méthodologiques

La modélisation des phénomènes/événements de l'espace est une véritable gageure pour la communauté des géographes et autres spécialistes des sciences de la terre. Nous l'avons déjà soutenu dans la présentation de notre itinéraire méthodologique.

De la modélisation

La modélisation est un art ou, à tout le moins, un savoir-faire : celui d'élaborer une construction mathématique capable de représenter une portion bien définie de la réalité. Cependant, cette construction n'est pas une fin en soi. L'utilité d'un modèle numérique ne vient que dans un second temps lorsqu'on va lui imposer diverses contraintes afin d'engranger des informations utiles quant au comportement du système réel qu'il représente. Une mise au point s'impose. Les résultats que peut donner un modèle numérique ne sont rien de plus que le reflet des spécificités du modèle lui-même et il n'existe aucun lien intrinsèque entre le modèle numérique et la réalité qu'il est sensé représenter. Les seuls liens effectifs résident dans la compétence du modélisateur ou dans la confrontation des résultats numériques avec des mesures expérimentales effectuées sur le système réel. Le modèle mathématique est bel et bien une construction virtuelle, c'est-à-dire, en puissance, autant une illusion trompeuse qu'une image fidèle.

Le modélisateur qui envisage de la reproduction de la réalité peut être dépassé par le nombre et l'ampleur des simplifications à concéder. Car, chacun des aspects de la réalité doit être, dans l'élaboration d'un modèle, soit négligé, soit exprimé par une expression ou une loi mathématique donc une loi simple. Les théories mathématiques sont toujours des constructions édifiées « à partir de rien du tout » (à l'exception des théories fractales ou chaotiques) et leur complexité est uniquement tributaire du travail consenti par le théoricien. Reconnaître un dromadaire, dit la sagesse populaire au Sénégal, est chose facile mais, le décrire en est une autre. Et, comme l'exprimait EINSTEIN (1979) « Nous ne savons pratiquement pas quelles images du monde de l'expérience nous ont déterminé à la formation de nos concepts et nous souffrons terriblement en essayant de représenter le monde de l'expérience, au-delà des avantages de la figuration abstraite, à laquelle nous nous sommes forcés à nous habituer ».

Du modèle à la cartographie

Il s'agit pour nous de représenter, partant de la connaissance de la dynamique de la LdB et des impacts de la « brèche », les scénarii possibles sur l'évolution de l'embouchure par l'analyse du site d'investigation que nous avons choisi (figure 6).

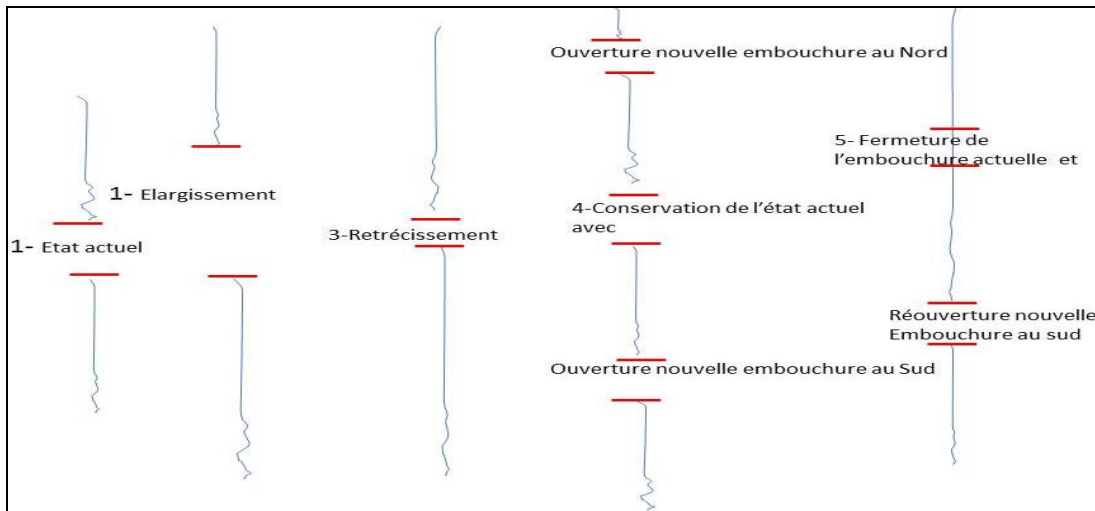


Figure 6. Scenarii possibles d'évolution de l'embouchure

Il est évident que l'on ne peut, en l'état actuel de la connaissance de la dynamique des milieux concernés, établir avec une précision mathématique l'évolution des formes de la LdB. Aussi bien l'évolution des reliefs et microreliefs littoraux que celle de l'embouchure en tant qu'unité caractéristique et déterminant du paysage. Ainsi, la précision espérée de l'opération de modélisation de la dynamique se fait sur des unités reconnues et individualisées. Ce qui accrédite la pertinence de la fragmentation de l'unité géomorphologique que constitue la LdB en diverses sections linéaires, surfaciques et volumiques (BAILLY S.A., 1994).

De façon didactique, nous procéderons au tri des modèles dans le but de choisir celui qui nous semble le mieux adapté et le plus pertinent pour le suivi prospectif de la « brèche ». Les modèles les plus utilisés présentent les aptitudes et limites suivantes :

Modélisation polygonale : le modèle, comme son nom l'indique, est assimilé à un ensemble de polygones. Ce polyèdre est donc décrit par la liste des sommets et des arêtes. Si les polygones sont orientés, on pourra différencier l'extérieur et l'intérieur du modèle. Si l'on veut lever l'ambiguïté apportée par des polygones non plans et gagner en précision, on utilisera uniquement des triangles : la finesse de la triangulation est de l'appréciation du modéleur. Cependant, sans effet de lissage, l'objet représenté apparaîtra plus ou moins anguleux si la définition en facettes est faible. En général, le lissage de Gouraud, réalisé par la cartographie 3D, est suffisant pour donner un aspect plus lisse au modèle.

La modélisation polygonale se sert d'outils de base identiques sur tous les logiciels 3D, ainsi que certains outils spécifiques aux logiciels génériques, aux logiciels spécialisés et aux plug-ins et scripts. Parmi ces outils, les plus répandus sont l'extrusion, la coupe (*cut, split...*), la soudure/rétractation (*weld/collapse*) et la révolution.

L'extrusion consiste à surélever une ou plusieurs faces (adjacentes ou non) ou un profil 2D le long d'une trajectoire et de créer les faces venant combler le vide occasionné par le déplacement de l'élément de départ. Par exemple, extruder un cercle donne un cylindre ouvert ou un tuyau qui suit la trajectoire. La coupe consiste à créer des arêtes (*edges*) sur un maillage, ainsi que les points correspondants aux intersections des arêtes déjà existantes et

celles nouvellement créées. On peut ainsi affiner un modèle, en ajoutant des détails sur certaines zones de l'objet ou certaines régions, notamment par l'ajout de boucles d'arêtes (*edgeloops*) extrêmement utilisées en modélisation organique.

La soudure/rétractation consiste à souder les sommets (*vertices*) entre eux, pour simplifier un maillage, boucher des trous ou faire converger des arêtes. La révolution consiste à faire tourner un profil 2D autour d'un axe 3D : on obtient ainsi un volume de révolution. La modélisation polygonale induit une marge d'erreur de proportions et de dimensions le plus souvent invisible à l'œil nu. Dans le cinéma d'animation, les modèles 3D organiques sont le plus souvent lissés. Le lissage consiste à subdiviser un maillage (une itération correspond à une subdivision de chaque arête, soit dans le cas de face à quatre côtés, une subdivision en quatre faces) et arrondir les faces obtenues selon différents algorithmes, afin de gommer l'effet anguleux des modèles obtenus par modélisation polygonale. D'une construction relativement longue, la modélisation polygonale permet de saisir l'évolution diachronique d'un objet. C'est la technique majoritairement utilisée dans le jeu vidéo, et le cinéma d'animation.

Modélisation par courbes NURBS : Non uniform rational basic spline/Spline basique rationnelle non uniforme ou NURBS consiste en un réseau de courbes créé grâce à des points de contrôles (*control vertices*). L'interpolation des courbes entre ces points peut se faire automatiquement selon un algorithme NURBS, par la manipulation de tangentes de courbe de Bézier, ou encore par modification des paramètres d'interpolation.

La modélisation par courbe se base sur un maillage adaptatif, conçu pour adapter ses subdivisions à la complexité des courbes dans une région donnée. Une surface parfaitement plane aura un nombre de subdivision très faible ou nul. C'est la technique de modélisation la plus précise. C'est la raison pour laquelle elle est massivement utilisée en architecture et en CAO industrielle, lorsque le souci de précision prime. Elle est utilisée dans les conceptions de type génie civil. La modélisation NURBS est le plus indiqué ni la LdB devait recevoir, pour sa protection, une digue de renforcement ou un barrage en épis.

Modélisation par subdivision de surface : dans le domaine de la CAO et des mathématiques, les surfaces de subdivision sont une façon de créer des surfaces lisses développant de plus en plus un maillage linéaire par morceaux. La surface lisse finale, peut être calculée comme la limite du procédé itératif de subdivision de chaque face polygonale en un sous-ensemble de faces approchant mieux la surface lisse finale. La surface de subdivision regroupe un peu des deux méthodes classiques (polygonale et NURBS). Elle consiste à accélérer le processus grâce à la subdivision automatique d'une partie de la surface (figure 7). Ceci permet d'ajouter des détails à certains endroits uniquement, sans se soucier du nombre de faces comprises sur la globalité de l'objet.

Elle se rapproche de la modélisation polygonale par les techniques employées lors de la création de la forme, et de la modélisation par NURBS en ce qui concerne le rendu de la surface, c'est-à-dire son arrondi. Elle est présente dans de nombreux logiciels professionnels (Maya, 3ds Max, Lightwave, Softimage, Modo, ...).

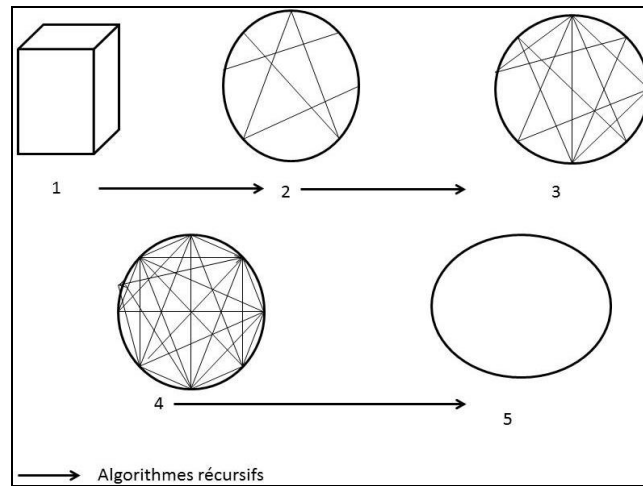


Figure 7. Processus de subdivision de surface par mobilisation polygonale

Les procédés de subdivision sont par nature des algorithmes récursifs. La méthode débute à partir d'un maillage (ou *mesh*) donné. Un *schéma de subdivision* est alors appliqué à ce maillage. Ce procédé agit sur le maillage en le subdivisant, en créant de nouveaux points et de nouvelles faces. La position des nouveaux points est calculée à partir de celle des anciens points les plus proches. Dans certains schémas, les positions des anciens points sont aussi remises à jour à partir des nouveaux points. Ce procédé produit un nouveau maillage contenant bien plus de faces polygonales que l'ancien maillage. Le nouveau maillage peut alors servir comme données d'entrée au schéma de subdivision, afin de raffiner encore plus. Cependant le but de l'application itérative d'un schéma de subdivision n'est pas forcément de produire un maillage plus lisse que le maillage d'entrée.

Modélisation par surfaces implicites : une surface implicite est la surface de niveau d'une fonction différentiable f définie un ouvert de R^3 .

- L'exemple le plus élémentaire est sans nul doute l'exemple des plans affines. Si l est une forme linéaire sur R^3 , alors $l : R^3 \rightarrow R$ est une application différentiable et tout réel est une valeur régulière de l . Pour r donné, $\{l = r\}$ est une surface implicite de R^3 .
- Autre exemple élémentaire, si q est une forme quadratique non dégénérée de R^3 , alors toute valeur non nulle est une valeur régulière de q :
 - Si q est définie positive, alors pour $r < 0$, la surface implicite $\{q = r\}$ est vide ; et pour $r > 0$, $\{q = r\}$ est une sphère.
 - Si q est de signature non définie $(2, 1)$, la surface implicite $\{q = r\}$ est un hyperboloïde à une ou deux nappes suivant le signe de r .
- La trompette de Gabriel est définie par la relation implicite :

$$(x^2 + y^2)z^2 = a^4 \text{ avec } a \text{ non nul.}$$

La trompette de Gabriel est une surface de révolution.

Modélisation par géométries : la géométrie de construction de solides (Constructive Solid Geometry) est une technique pour laquelle la représentation d'un objet solide comme combinaison d'objets solides simples (ex : cylindre, sphère, cône, tore, etc.) se fait à l'aide d'opérateurs géométriques booléens (ex : union, intersection, soustraction). Cette méthode est très adaptée à la modélisation d'une surface en 2D c'est-à-dire une surface plane. Elle n'intègre donc pas le volume mais, permet de suivre de façon linéaire l'évolution d'un trait.

Modélisation volumique : elle utilise le voxel (volumetric picture element ou volumetric pixel) coordonnées spatiales, voire temporelles, de positionnement ainsi que, facultativement, une taille relative à l'unité utilisée (figure 8).

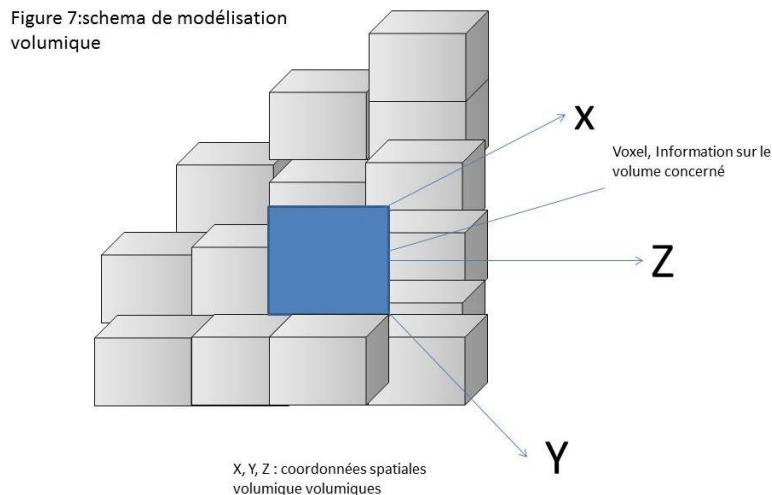


Figure 8. Schéma de modélisation volumique

Le **voxel** est un pixel en 3D. Le **voxel** est un terme nettement plus souvent utilisé que son synonyme, le **boxel**. Il consiste à stocker une information colorimétrique avec ses coordonnées spatiales, voire temporelles, de positionnement ainsi que, facultativement voire si nécessaire, une taille relative à l'unité utilisée ou d'autres informations telles qu'une matière... Ils s'inscrivent plus généralement dans des espaces matriciels bien que les espaces vectoriels leur soient favorables. On notera que leurs coordonnées spatiales peuvent être polaires.

Leur point faible (*par rapport à la 3D vectorielle*) est de nécessiter énormément de ressources, tant pour leur stockage que pour leur rendu. Cependant, des algorithmes de compression traditionnels à l'imagerie numérique ou l'informatique peuvent être employés sans difficulté.

La revue des principaux modèles nous interpellent sur la représentation mathématique des réalités spatiales : le géographe adopte le même raisonnement qui s'applique à la mécanique

analytique et à toutes les sciences logico-déductives. Par la lecture diachronique du phénomène/événement, il reconstitue la logique de fonctionnement du milieu naturel d'après les interactions connues, il pourra même inventer une nouvelle logique. C'est que nous avons tenté en adoptant le premier modèle c'est-à-dire la modélisation polygonale.

5. Discussions

En tenant compte des réserves que nous avons posées dès le départ, obligation nous est faite d'avoir une attitude scientifique « intermédiaire » c'est-à-dire qui n'obère pas la réalité mais qui ne l'exagère pas non plus. L'adoption de la modélisation polygonale nous a conduits à saisir les objets en mode topologique. En saisie topologique, on procède de la manière suivante : on numérise (ou digitalise) les lignes en mode « spaghetti », c'est-à-dire dans n'importe quel ordre sans chercher à établir *a priori* une logique (le logiciel étant chargé de procéder automatiquement au tri et à la structuration des données). Voici un exemple de requête lié au suivi de l'évolution, dans le bief estuarien du fleuve Sénégal, de sédiments sableux provenant de l'onde de crue : la structuration topologique du graphe du bief estuarien -un segment de ligne brisée par tronçon- donne pour chaque ligne un certain nombre de caractéristiques telles que la morphologie des rives, la hauteur de l'eau, la vitesse de circulation, etc. Ce qui indique le temps nécessaire aux sédiments de se déplacer d'un point à un autre et surtout, les parcours possibles d'un point à un autre en mettant en exergue le plus court chemin.

Dans un cadre plus général, le trait de côte au niveau de Saint-Louis se présente comme une interface entre deux systèmes hétérogènes ; le système marin et le système côtier, d'où la nécessité de représenter ce couplage. Nous obtenons deux catégories : les éléments statiques et les éléments dynamiques. Les premiers sont considérés comme des objets (au sens informatique) et les derniers, *a priori*, doué d'autonomie, comme des agents. Concernant les agents, nous avons considéré : les agents vagues (et/ou courants), les agents boules de sables et les agents segments de trait de côte.

Le rendu obtenu par modèle 3D laisse apparaître la structure polygonale utilisée pour la synthèse réalité-images, par ajout, soustraction et/ou modifications des constituants. Les interrogations sur les possibilités de reconstitution des paysages anciens de la LdB et celles de prévision de l'évolution des paysages actuels trouvent là une réponse parmi d'autres. Et, c'est l'utilisation du MNT qui révélera les dimensions les plus complexes de la LdB par :

- l'élaboration de blocs-diagrammes, des profils et des mises en perspectives ;
- l'estimation de volumes de terrain calculés entre les profils pour les applications de génie civil (par exemple, le reprofilage de la piste d'accès à la LdB, la construction de digues, etc.) ;
- la construction de cartes en plages par classes de niveau (RIMBERT S., 1990);
- la détermination des zones cachées dites de défilement (BUFFER) ;

- la construction de cartes de valeurs de pentes, d'éléments géomorphologiques tels que concavités, convexités, rupture de pentes, linéaments) ;
- la construction de cartes d'ombres portées et des cartes d'ombrages graphiques (RIMBERT S., 1990).

Pour la reconstitution d'unités paysagères à microtopographie accentuée, comme la Langue de Barbarie, la méthode de l'interpolation polynomiale donne d'excellents résultats à la visualisation. Cependant, la représentation de couches géologiques à affleurement partiel requiert la méthode du kriegeage. Le premier bénéfice de la numérisation est la possibilité, à partir des valeurs observées d'une carte d'extraire des néo-valeurs. La carte devenant source de données dérivées. Un autre bénéfice, non moins négligeable, est la possibilité de « mise en volume » ou la représentation en trois dimensions « 3D ». Le 3D demande à ce que les tableaux d'observations préparés en lignes et colonnes, à référentiel cartésien soient étendus à des trames en parallélogrammes, à référentiel galiléen. Un point d'image y est repéré par rapport à trois axes X, Y, Z .

Conclusion

En géographie et dans les disciplines connexes des sciences de la terre, les formes libres dont on connaît l'allure (comme le dromadaire de la parabole, facile à reconnaître mais difficile à décrire) mais pas l'équation sont nombreuses (EINSTEIN A., 1979). La connaissance modélisée (donc simplifiée) des évolutions de la LdB est d'une importance stratégique pour le devenir de la ville de Saint-Louis. Cette bande de terre est un lieu qui a reçu d'importants investissements financiers pour le développement des activités touristiques ; elle est aussi, dans un contexte de changement climatique, le dernier rempart de la ville face (l'île de Saint-Louis est un patrimoine historique mondial classé, en 2000, par l'UNESCO) à la furie des eaux de haute marée de l'océan Atlantique. L'existence et la pérennité de la LdB, comme flèche littorale protectrice et régulatrice de la double hydrodynamique marine et fluviale, est l'un des éléments clés du projet de construction du port de Saint-Louis, envisagé dans le cadre de la mise en œuvre du programme de l'Organisation pour la Mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS) dans son volet « navigabilité du fleuve Sénégal ».

Il ressort de cet essai que l'approche multi-agents pour modéliser le phénomène de l'érosion de la LdB marque les limites de la modélisation numérique (complexité de l'objet étudié, complexité de programmation, problème d'adaptation et de flexibilité,...). Il est évident que l'insertion de données par la télédétection peut atténuer les difficultés de calibrage des observations et de validation des options d'aménagement du littoral. Ceci est d'autant plus vrai, d'une part, que deux autres ouvertures naturelles viennent de se réaliser sur la LdB (octobre 2012) au sud de la brèche-embouchure ! D'autre part, la connaissance précise des impacts liés aux travaux de génie civil effectués sur le littoral Atlantique au nord de Saint-Louis c'est-à-dire en république islamique de Mauritanie, est un élément fondamental pour, à tout le moins, comprendre et représenter les évolutions physiques des systèmes hydrogéomorphologiques de Saint-Louis à Nouakchott.

*La prétention de cet article est d'apporter, à la volonté d'ouverture et d'interdisciplinarité du laboratoire Leïdi, les arguments qui pourraient justifier et soutenir auprès des informaticiens et mathématiciens le bien-fondé de nos démarches de collaboration au sujet de la compréhension des phénomènes spatiaux qui caractérisent ce milieu hydrogéomorphologique complexe du delta du fleuve Sénégal. Car, il ne saurait s'agir pour nous géographes de tenter de nous substituer aux ingénieurs de génie civil mais, de tenir davantage d'arguments de précision lorsque nous formulons des préconisations pour l'aménagement et la gestion des espaces littoraux les plus fragiles.

Références bibliographiques

ARMÈDE R., 1999. Effet de l'extraction des granulats marins sur la stabilité du littoral, Rapport de stage de fin d'études de l'ENTPE effectué à Ifremer Brest et au LNH. 205p.

BAILLY S.A. (1994) – Géographie et Représentations spatiales.

EINSTEIN A. (1979) – Comment je vois le monde, Flammarion, Paris « Collection Nouveaux horizons ».

HILTON M.J., HESP P., 1996. Determining the limits of beach nearshore sand systems and the impact of offshore coastal sand mining. *Journal of Coastal Research*, 12, 2, 496-747.

KLEIN M.D., 1999. Large-scale sandpits, M.SC. Thesis. Delft Hydraulics.

LEMOINE M., CLABAUT P., SIMON S., AUGRIS C., 1999. Étude de la souille expérimentale d'exploitation de granulats en mer dite " souille CNEXO " en baie de Seine. Rapport Ifremer pour la préfecture de région Haute-Normandie, 23 p.

RIMBERT S. (1990) – Carto-graphies, Hermès, Paris « Collection Traité des Nouvelles technologies série géographie assistée par ordinateur.

ROUET P. (1991) – Les données dans les systèmes d'information géographique, Hermès, Paris « Collection des Nouvelles technologies série géographie assistée par ordinateur.

ROELVINK J.A., WALSTRA D.J.R., CHEN Z., 1994. Morphological modelling of Keta Lagoon case. Proc. 24th Coastal Engineering Conf., ASCE, Kobe, Japan, 3223-3236.

SY BOUBOU ALDIOUMA (2008). L'ouverture de la brèche sur la Langue de Barbarie et ses conséquences, approche géomorphologique. In RGLL, 19 p.

UDA T., AGEMORI C., CHUJO N., 1986. Beach changes caused by offshore dredging. *Coastal Engineering in Japan*, 29, 215-226.