
ÉTUDE DIACHRONIQUE ET HISTORIQUE DE L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE DE LA BAIE DE TANGER (MAROC)

Jamal Eddine EL ABDELLAOUI¹ et André OZER²

¹ Faculté des Sciences et Techniques, Département des Sciences de la Terre, B.P. 3070 Tanger, Maroc
Téléphone : +212 39 39 39 54 ; télécopieur : +212 39 39 39 53 ; courriel : masgeoinfo@yahoo.fr

² Département de Géographie physique et Quaternaire, Université de Liège,
allée du 6 Août, n° 2 (Bâtiment B11), 4000 Liège, Belgique
Téléphone : +32 4 366 54 46; télécopieur : +32 4 366 57 22 ; courriel : aozer@ulg.ac.be

Soumis le 8 mars 2007 ; révisé le 18 mai 2007 ; accepté le 30 2007- © Revue Têledétection, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 157-171

Résumé

L'analyse diachronique des photographies aériennes et des images satellitaires Corona montre que l'érosion de la plage meuble de la baie de Tanger s'est produite à des vitesses variables entre 1972 et 1997. La période de 1972-1981 enregistre une érosion généralisée avec un taux moyen de 4 m/an. La période de 1981-1997 enregistre un rétablissement de la tendance moyenne avec la formation de trois secteurs, le premier en érosion avec un taux moyen de 1,5 m/an, le deuxième stable et le troisième secteur en engraissement. À cause de son isolement des zones de production, la plage meuble de la baie de Tanger évolue en système fermé. En fait, d'une part, la construction du port a entravé le transit littoral engendré par la houle ouest et, d'autre part, l'aménagement du versant ouest a immobilisé les matériaux sableux qui ne contribuent plus à l'apport solide actuel. Enfin le courant de dérive vers l'ouest, qui redistribue les galets apportés par l'oued Halou, est rompu par la construction d'un système de défense. Les apports sont désormais immobilisés entre le brise-lame et l'épi est et ne contribuent plus à la dynamique sédimentaire, ce qui aggrave ainsi l'appauvrissement du stock sédimentaire mis en jeu. La plage ouest, n'étant plus alimentée par les sédiments acheminés par la dérive est comme auparavant, verra sa vulnérabilité augmenter progressivement. La cicatrisation de la plage à la suite des tempêtes successives se fera de plus en plus difficilement. Cette réalité est déjà ressentie en 2006. D'autre part, une partie de la côte à falaise argileuse, considérée comme stable, enregistre une érosion significative. Le taux de recul moyen enregistré entre 1981 et 1997 est de 1,5 m/an. La reconstitution du système côtier naturel et le suivi des aménagements successifs de la baie montrent que l'anthropisation du littoral a déséquilibré le système de manière irréversible.

Mots clés : étude diachronique, photographies aériennes, système côtier, érosion, plage, falaise, maroc.

Diachronic and historic study of changes to the Tangier bay coastline (Morocco)

The diachronic analysis of air photos and Corona satellite images shows that the erosion of the sandy coast of Tangier bay occurred at variable speeds between 1972 and 1997. The period between 1972-1981 shows generalized erosion with a rate of 4 m/year. The period of 1981-1997 registers a restoring of the average trend with the formation of three sectors, the first one in erosion with an average rate of 1,5 m/year, the second sector is stable and the third in accretion. Because of its remoteness from the production zones, the sandy beach evolves in a closed system. In fact, on the one hand, the construction of the harbour jetty intercepted the longshore drift generated by the west swell and, on the other hand, the development of the western hillside immobilized the sandy materials that do not contribute anymore to the current solid contribution. Finally, the longshore drift which redistributes the pebbles brought by the oued Halou is broken by the construction of a defence system. The fluvial discharges are henceforth immobilized between the breakwater and the eastern groyne and do not contribute to the sedimentary dynamics. This situation aggravates the impoverishment of the involved sedimentary stock. At present, the erosion that drew sediments of the beach from the most easterly beach to accrete that western portion can't find more materials because of the erosion and of the quasi-total occupation of the beach. In fact, the western beach not nourished by sediments, will see its vulnerability increase gradually. The repairing of the beach further to successive storms is more difficult. This reality is already felt in 2006. On the other hand, a portion of the clayey coastal cliff of Tangier bay, considered as stable, sustains significant erosion. The mean rate of cliff retreat, recorded between 1981 and 1997, is estimated at 1,5m/year. The reconstruction

of the natural coastal system and the monitoring of the successive developments in the bay show that the anthropization of the coast has unbalanced the system in an irreversible way.

Keywords : diachronic study, aerial photographs, coastal system, erosion, beach, cliff, Morocco.

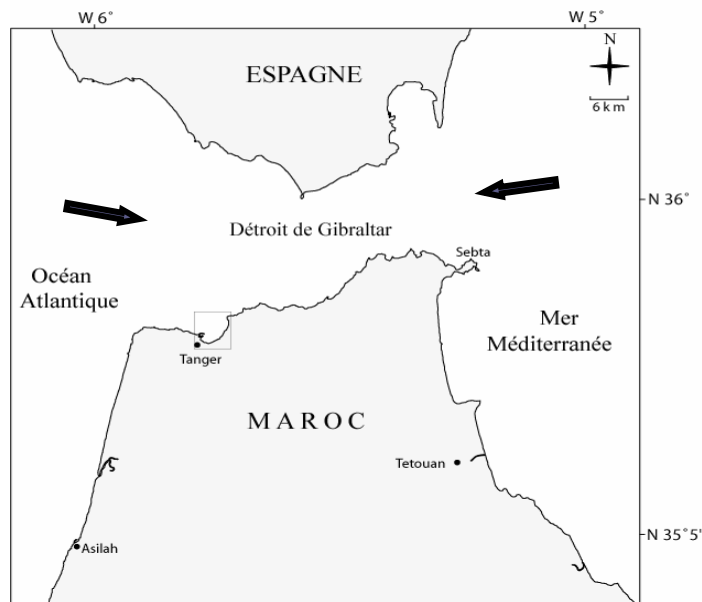
1. INTRODUCTION

La méthode d'analyse diachronique, basée sur la comparaison de photographies aériennes, permet d'apprécier la dynamique du trait de côte au cours d'une période donnée. Elle permet aussi, par la confrontation des résultats avec les données historiques multisources, de mieux comprendre l'impact des aménagements successifs sur le système côtier.

Dans la baie de Tanger (figure 1), les travaux de construction et d'expansion du port ont modifié l'équilibre sédimentaire. Les forces agissant sur le système côtier ont pour effet de déplacer les sables à l'intérieur du périmètre de la plage, d'où l'amaigrissement des estrans et des petits fonds dans la zone orientale, de l'oued Halou à l'oued Souani, et l'engraissement de la plage de Tanger au pied de la ville à l'ouest, sur le flanc est du port (Lafond, 1952 ; Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972) (figure 2). Le taux d'érosion calculé sur base de comparaison de cartes bathymétrique au cours de la période de 1950-1972, est de 2 à 3 m/an pour le secteur oriental de la plage meuble. Dans la partie occidentale de cette dernière, le taux d'engraissement maximum enregistré sur cette même période est de 5 m/an au pied du môle du port (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

Les objectifs de ce travail sont :

- d'analyser l'évolution de l'érosion de la côte meuble de la baie de Tanger après 1972 en se basant sur une étude diachronique ;
- de réaliser une étude historique (sur 150 ans) des aménagements successifs du littoral et d'identifier l'impact de l'anthropisation sur l'évolution de l'équilibre du système côtier ;
- d'évaluer la dynamique de la zone à falaise à l'est de la baie de Tanger et de discuter de la stabilité des versants et des conséquences sur l'aménagement de la zone.



Modifié de Humbert (1971)

Figure 1. Situation de la baie de Tanger. Les flèches indiquent les principales directions des vents. *Tangier bay location map. Arrows indicate the main wind directions.*

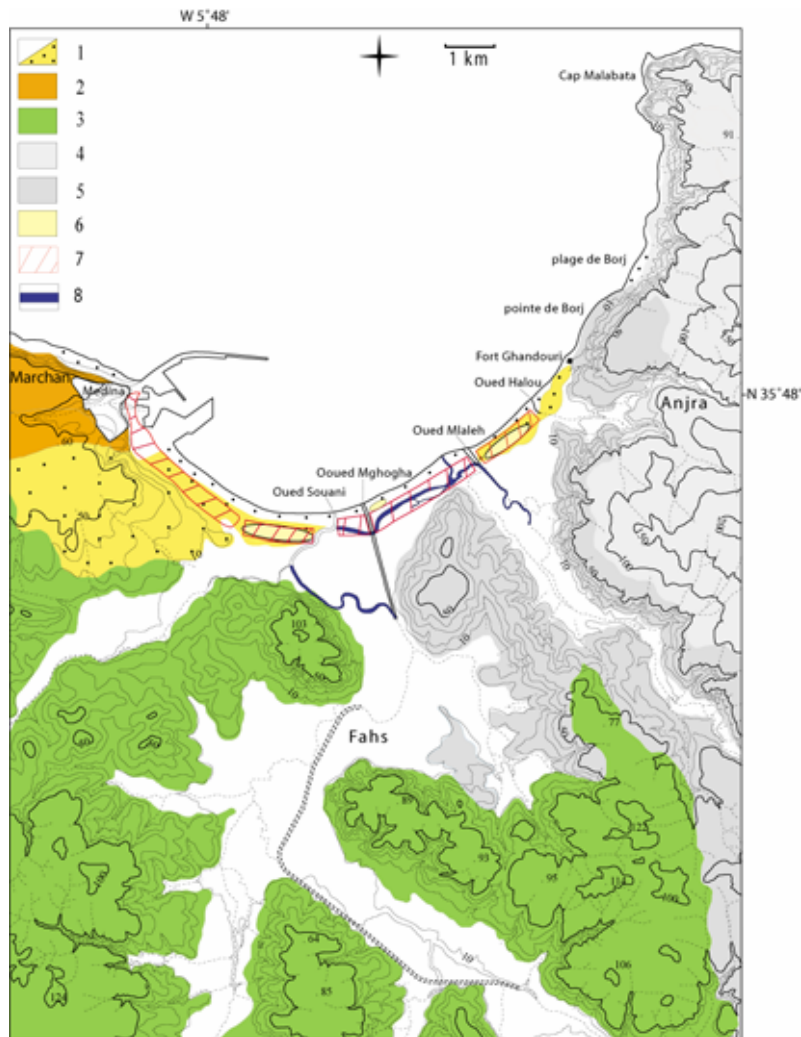


Figure 2. Carte litho-topographique. (1) Quaternaire, (2) Grès numidien, (3) Argile de l'unité de Tanger, (4) et (5) Argile et marne à grès micacé ou à calcaire, (6) Cordons dunaires, (7) Arrière-plage en terrasse, (8) Cours d'eau abandonnés. *Litho-topographic map.* (1) Quaternary, (2) Numidian sandstone, (3) Tangier Clay, (4) et (5) Clay and marl with micaceous sandstone or with limestone, (6) sand dunes, (7) terraced upper beach, (8) abandoned streams.

2. CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Géologie et géomorphologie

Le littoral de la baie de Tanger se caractérise par deux types de côtes : une côte occidentale meuble et une côte orientale rocheuse.

La côte occidentale meuble, formée par une plage sableuse s'étend du môle du port jusqu'au fort Ghandouri, sur une longueur de 4,8 km (figure 2). On l'appellera la grande plage de Tanger. Les principaux cours d'eau de la baie y débouchent, à savoir, les oueds Halou, Mlaleh, Mghogha et Souani. Seul l'oued Halou transporte des galets, du gravier et du sable, les autres oueds transportant principalement de la vase et du sable fin. La charge de sable, de gravier et de galets qui atteint la plage meuble de la baie est estimée entre 5 000 et 10 000 m³/an (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972). L'estran est constitué de sable de 0,20 mm de diamètre auquel s'associe, en haut estran et à l'est de l'oued Mghogha, des galets qui deviennent de plus en plus abondants de l'oued Mghogha à la pointe du Borj. Les fonds marins, à l'est de l'oued Mghogha, sont sableux (D50 = 0,15 mm) jusqu'à -10 m de profondeur. Ils deviennent rocheux devant le massif de Bordj (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

La côte orientale rocheuse à falaise présente des pentes fortes à moyennes et elle s'étend du fort Ghandouri au cap Malabata, sur une longueur de 3,6 km (figure 2). Cette côte est entrecoupée par des plages meubles de dimension limitée, dont la plus importante est celle de Borj, qui s'étend sur 0,5 km. Ces plages sont alimentées en galets par des ravins et évoluent donc séparément de la côte de la grande plage de Tanger.

La baie de Tanger comprend trois unités géologiques (figure 2) :

- au centre, la plaine vallonnée du Fahs est largement ouverte sur le détroit ; elle est formée par l'unité para-autochtone de Tanger externe, constituée essentiellement d'argiles et de marnes d'âge Crétacé supérieur ; elle forme le soubassement géologique sur lequel sont charriés les autres unités ;
- à l'ouest, le massif de Marchan, formé par la nappe schisto-quartzeuse des flyschs de Melloussa, laquelle est surmontée par les grès nummidiens d'âge Aquitainien ;
- à l'est, le massif des Anjra, en charriage sur l'unité du centre, est formé par la nappe des flyschs de Beni-Ider, dont le faciès est constitué de marnes calcaires rouge suivies de marnes gréseuses micacées (Humbert, 1971).

La désagrégation, notamment par érosion marine, des formations des deux dernières unités a constitué la source principale d'alimentation en sable de la baie.

2.2. Caractéristiques météorologiques

La classification des vents à Tanger révèle deux principaux types :

- les vents d'est et nord-est, ou « Chergui », qui règnent principalement au printemps et en été ; déchargés de leur humidité, ils contribuent ainsi à l'assèchement de l'atmosphère ;
- les vents d'ouest et nord-ouest, ou « Gharbi », qui dominent en automne et en hiver ; ils sont d'origine atlantique et une source d'humidité et de précipitations (Thauvin, 1971).

À Tanger, le climat est assez venteux. En effet, les moyennes mensuelles supérieures à 18 km/h représentent plus de 60 %. Le vent calme inférieur à 7,2 km/h ne dépasse pas 20 % (Boughaba, 1992). À la station météorologique de Tanger-Aérodrome, située plus au sud sur la façade atlantique, les observations montrent que les vents violents instantanés de vitesse supérieure à 60 km/h sont observés 81,5 jours par an en moyenne (calculée sur la période 1971-2000). La vitesse maximale absolue est de 172,8 km/h. Les moyennes mensuelles sont souvent supérieures à 21,6 km/h et les forts vents d'est peuvent atteindre des valeurs de 100,8 km/h à la station de Tanger-Ville (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

Alors que les vents d'est prédominent dans les transferts de sable des hauts estrans, les vents d'ouest n'ont qu'une action géologique limitée (Lafond, 1952). Le transit éolien vers l'ouest est de 5 000 à 10 000 m³/an. Les pertes par déflation sur la totalité de la plage sont de l'ordre de 18 000 à 25 000 m³/an (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

Au port de Tanger, la marée est semi-diurne et sa hauteur est de 0,3 m en mortes-eaux et de 2,6 m en vives-eaux. Le niveau moyen de la mer est de 1,4 m. À l'intérieur de la baie de Tanger, les courants de marée ont une vitesse de l'ordre de 0,3 m/s à 0,5 m/s. Le flot porte vers l'est et le jusant vers l'ouest. Par vents violents de secteur ouest, la hausse du niveau de la mer peut atteindre 0,2 à 0,45 m. Il est donc possible d'atteindre des niveaux de l'ordre de 3 m à la faveur de la conjugaison entre une marée de vives-eaux exceptionnelles et un vent violent d'ouest (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

La côte de Tanger est soumise à deux types d'agitation : des houles atlantiques venant d'ouest à nord-ouest et les clapots des vents d'est à nord-est.

À l'intérieur de la baie de Tanger, les houles venant d'ouest à nord-ouest ont une période de 5 à 17 s. Les valeurs extrêmes ont une hauteur significative de 4 m pour une houle annuelle arrivant avec une période de 9 s et de 5,3 m pour une houle décennale arrivant avec une période de 10 s.

Les clapots des vents d'est à nord-est sont dus à des vents locaux. Les vagues sont très cambrées et caractérisées par des périodes courtes de 3 à 6 s et pour des hauteurs de 0,5 à 2 m en moyenne à l'intérieur de la baie. Elles bordent la plage avec une incidence de 20 à 30 degrés. Les houles extrêmes ont une hauteur significative de 2,4 m pour une houle annuelle et de 3,7 m pour une houle décennale (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

Depuis la construction des ouvrages, l'action des houles du nord-ouest est surtout sensible à l'est de l'oued Mghogha. Elles ne parviennent cependant à la côte qu'avec une faible obliquité. Mais, lorsque les vents d'ouest à nord-ouest soufflent, ils induisent tout au long du littoral un courant atteignant 0,3 m/s pour un vent de 6 à 7 m/s. Les clapots d'est à nord-est renforcés par les vents sont à l'origine d'un mouvement général des courants vers l'ouest. Pour un vent d'est de 7 à 8 m/s, des courants côtiers évoluant entre 0,4 et 0,2 m/s ont été enregistrés (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

La prédominance des vents venant de l'est et la coupure du transit sableux dû au courant d'obliquité des houles du nord-ouest engendrent, dans la résultante générale des phénomènes, un transit littoral de direction ouest estimé à 35 000 m³/an (Lafond, 1952 ; Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972). À l'ouest de la grande jetée du port, l'arrêt du transit littoral venant de l'ouest a permis la formation d'une plage sableuse de dimension limitée (figure 2).

3. HISTORIQUE DES AMÉNAGEMENTS DU LITTORAL DE LA BAIE DE TANGER

Les premiers travaux portuaires ont débuté en 1905, avec la construction d'une jetée de 300 m de longueur. Cette dernière a été bâtie sur l'éperon rocheux ouest. Ces travaux ont peu déformé la propagation de la houle à l'intérieur de la baie, mais ils ont partiellement perturbé le transit littoral entre la baie et le secteur ouest (Lafond, 1952 ; Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972). Différents travaux d'expansion du port se sont succédés avec la prolongation successive de la jetée en 1923-1933, 1954-1956 et 1961-1964. Ces travaux ont déformé profondément la propagation de la houle ouest à nord-ouest à l'intérieur de la baie (Lafond, 1952 ; Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

L'aménagement de l'arrière plage et de l'avant-pays de la baie de Tanger a commencé au début du siècle dernier. Ainsi, l'arrière-plage de la partie occidentale de la baie a été aménagée en corniche (figure 2). Avant 1920, la transformation de cette zone bordière en un large avenue a causé la fixation définitive d'une partie de la plage meuble et du cordon dunaire occidental. D'autre part, l'évolution de la ville a eu pour conséquence la fixation des sables flamandiers de ce qu'appelait Gentil (1906, *in* Humbert, 1971) la grande dune de Tanger (figure 2).

L'aménagement des cours d'eau a été réalisé, en 1950, par la construction du canal de Mghogha et la séparation des principaux affluents de l'oued Mghogha pour former trois embouchures à savoir les oueds Souani (bassin versant de 10 km²), Mghogha (bassin versant de 60 km²) et Mlaleh (bassin versant de 20 km²).

Au cours de l'année 1986, un système de défense, formé par deux épis et d'un brise-lame, a été mis en place, entre l'embouchure des oueds Mlaleh et Halou. Ce système devait protéger les installations balnéaires construites sur une zone en pleine érosion (figure 3).



Figure 3. Vue partielle du système de défense installé en 1986. On remarque la formation d'un tombolo derrière le brise-lame.
Partial view of the system of defence installed in 1986. Note the formation of a tombolo behind the breakwater.

4. MÉTHODOLOGIE

L'étude des changements passés d'un littoral peut se faire par différentes méthodes d'analyse. L'interprétation de photographies aériennes, l'analyse de cartes (historiques, topographiques et hydrographiques), l'étude des images satellitaires, des relevés sur le terrain et des enquêtes auprès des gens du milieu constituent autant de sources d'information pour étudier le trait de côte (Grenier et Dubois, 1990).



Figure 4. Photographie aérienne de 1981. Forte érosion : niches d'arrachements de la plage de Ghandouri. *Aerial photograph of 1981. Strong erosion: erosion scars of the beach at Ghandouri.*

L'approche méthodologique dans ce travail consiste, dans un premier temps, à réaliser une étude diachronique du trait de côte à l'aide de missions de photographies aériennes (couvrant une période de 25 ans) afin de quantifier la dynamique spatio-temporelle du trait de côte. Dans un second temps, elle consiste en une analyse iconographique qualitative réalisée à partir d'une documentation historique variée (cartes bathymétriques et topographiques, photographies au sol, photographies aériennes et images satellitaires) étalée sur une période de 150 ans (tableau 1). L'analyse historique nous permettra de reconstruire les caractéristiques géomorphologiques du système côtier et le suivi des aménagements successifs. Dans un troisième temps, elle consiste en la collecte de témoignages auprès des riverains qui ont vécu à Tanger à partir des années 1920, ce qui permettra d'obtenir des précisions sur des éléments de géomorphologie, de la position du trait de côte par rapport à des repères sur le terrain et sur les zones d'extraction du sable. Enfin, des observations et des mesures sur le terrain au cours des dernières années serviront à l'évaluation de la situation actuelle.

Tableau 1. Ressources cartographiques et données de télédétection utilisées dans ce travail. *Cartographic material and aerial surveys used in this work.*

Documents	Année d'acquisition
Photographies aériennes	1958, 1963, 1970, 1981, 1987, 1994, 1997
Images Corona	1967, 1972
Images satellites HRV(P) de SPOT	1996
Cartes bathymétriques	1855, 1935, 1972
Cartes topographiques	1965, 1974, 1984, 1993
Cartes géologiques	1965, 1972

4.1. Choix de la ligne de référence

L'étude de la dynamique du trait de côte par l'analyse diachronique commence par le choix de la ligne de référence. Dans le cas des côtes sableuses, l'ados de plage s'avère être le plus fiable (Robin, 2002). C'est la ligne de contact entre le haut de la plage et l'arrière plage. Elle est matérialisée par une rupture de pente qui est identifiable sur les photographies aériennes (Gaillot et Chaverot, 2001). Dans cette étude, l'ados de plage a été pris comme ligne de référence représentative du trait de côte. Au niveau de la plage sableuse de la baie de Tanger, l'ados de plage est constitué, selon les secteurs, par des ruptures de pente taillées dans les remblais de terrassement, dans des dépôts d'argile noire flamand ou dans le sable de l'arrière-plage. Cette ligne présente, par endroits, des niches d'arrachement, ce qui lui donne un aspect en dents-de-scie (figure 4). Au niveau de la zone à falaise, le choix de la ligne de référence est délicat. Le haut de la falaise est pris comme trait de côte et, dans le cas des secteurs affectés par des mouvements en masse, le trait est représenté par la cicatrice d'arrachement.

4.2. Étude diachronique

Une étude diachronique consiste souvent à utiliser des photographies aériennes verticales, dont l'échelle varie en général entre le 1 : 15 000 et le 1 : 30 000 ; ces photographies sont géopositionnées sur base de cartes topographiques au 1 : 25 000 (Gaillot et Chaverot, 2001). Pour la présente étude, nous avons sélectionné les missions aériennes de 1981 et 1997 ainsi que des images de la mission d'espionnage américain « CORONA » déclassées de 1972, couvrant ainsi une période de 25 ans. Le choix des missions a été dicté par la volonté de compléter l'étude réalisée par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France sur la période de 1950-1972 ainsi que par la résolution et la qualité des photographies aériennes. Entre la mission la plus ancienne (1972) et la plus récente (1997), on a choisi la mission de 1981 vu la qualité des photographies et l'intérêt de l'information géomorphologique contenue dans celle-ci, en particulier l'effet des tempêtes sur le trait de côte.

Les étapes de traitement suivantes ont été réalisées : les photographies aériennes de 1981 et de 1997, dont l'échelle est de 1 : 17 500, ont été numérisées à une résolution de 600 dpi (1 pixel est égal à 0,73 m), les négatifs des images Corona ont été développées à 1 : 33 000 et les photographies obtenues ont été numérisées à la résolution de 600 dpi (1 pixel est égal à 1,375 m). Ensuite, les images ont subi une correction géométrique et un géopositionnement par rapport à la carte topographique à 1 : 25 000. Cette étape est indispensable pour pouvoir comparer les différents clichés. Par la suite, on a procédé à la numérisation des traits de côte, à la superposition des images multitudes et au traçage de transects perpendiculaires à la plage à tous les 100 m. La mesure de la distance qui sépare deux traits a permis de calculer les taux d'érosion et d'engraissement linéaires entre deux prises de vue (Gobert *et al.* 1996 ; Durand, 2001 ; Gaillot et Chaverot, 2001 ; Robin, 2002).

La marge d'erreur maximale d'une étude diachronique est fonction de cinq paramètres : la précision du document de référence, la précision du repérage des amers sur les photographies, l'erreur liée aux modèles polynomiaux utilisées par le logiciel, l'erreur sur la position exacte du trait de côte et l'erreur liée aux fluctuations saisonnières de trait de côte (Gaillot et Chaverot, 2001). L'erreur cumulée sur l'ensemble de la chaîne de traitement informatique est estimée à ± 6 m (Gaillot et Chaverot, 2001 ; Robin, 2002). Dans ce travail, la validité de l'erreur de ± 6 m pour chaque trait de côte a été vérifiée et seuls les déplacements supérieurs à la marge d'erreur sont retenus.

5. RÉSULTATS

5.1. Grande plage de Tanger

Au cours de la période de 1950-1972, le taux d'érosion était de 2 à 3 m/an entre l'embouchure de l'oued Mghogha et le fort Ghandouri (figure 2). Par contre, le trait de côte a avancé d'environ 5 m/an au pied du môle, cette valeur diminuant progressivement pour s'annuler à l'embouchure de l'oued Souani (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972). La zone entre le fort Ghandouri et le cap Malabata était considérée comme stable.

5.1.2. Évolution du trait de côte entre 1972 et 1981

Au cours de cette période une érosion généralisée a affecté la plage sableuse. Son impact s'est fait sentir depuis le fort Gandouri jusqu'au môle du port, soit sur une longueur de 4,73 km du trait de côte. On y distingue deux secteurs : un secteur en nette érosion et un secteur « en apparence » stable (figure 5).

Le premier secteur s'étend du fort Gandouri, à l'est, jusqu'au canal de Mghogha, à l'ouest, sur une longueur de 2,56 km. Dans ce secteur, le taux d'érosion linéaire diminue de l'est vers l'ouest. Le recul maximum est enregistré entre le fort Gandouri et Marbel, où le taux moyen d'érosion est de 4 m/an $\pm 1,33$. Il est largement supérieur à la moyenne enregistrée dans cette même zone entre 1950 et 1972, qui est de 2 m/an (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972). À l'ouest de Marbel, le taux d'érosion diminue progressivement pour atteindre 1,8 m/an $\pm 1,33$ et, finalement, tendre vers zéro au canal de Mghogha.

Le deuxième secteur s'étend du canal de Mghogha pratiquement jusqu'au môle du port, sur une longueur de 2,17 km. Il semble stable entre le canal de Mghogha et le point (3) sur la figure 5. Entre ce dernier et le môle, le trait de côte

enregistre un net recul, avec un taux moyen de 3,5 m/an. Ces résultats sont en contradiction avec les attentes, puisque ce secteur aurait dû connaître un engraissement avec un taux d'accumulation de 3 à 5 m/an (Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1972).

Pour mieux caller les résultats présentés ci-dessus, on a réalisé une étude diachronique en utilisant la mission aérienne de 1963, dont l'échelle est le 1 : 26 500, et celle de 1981. Au cours de cette période le taux d'érosion moyen calculé sur le tronçon s'étendant entre les oueds Mghogha et Mlaleh était de 3,75 m/an \pm 0,67. Cette valeur est supérieure à la moyenne calculée par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France, laquelle est d'un maximum de 3 m/an. Le taux d'engraissement moyen enregistré à l'ouest de la plage évolue entre 0,8 et 2,1 m/an \pm 0,67. Il est largement inférieur à la moyenne calculée par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France, lequel varie entre 3 et 5 m/an. Ces résultats confirment la réalité d'une érosion généralisée qui ressort de l'étude diachronique de 1972-1981.

Cette érosion est survenue alors que la tendance évolutive du trait de côte devrait maintenir deux secteurs sédimentaires observés depuis 1938, soit un secteur en érosion entre la pointe de Borj et le canal de Mghogha, et un secteur en accrétion entre ce dernier et le môle du port.

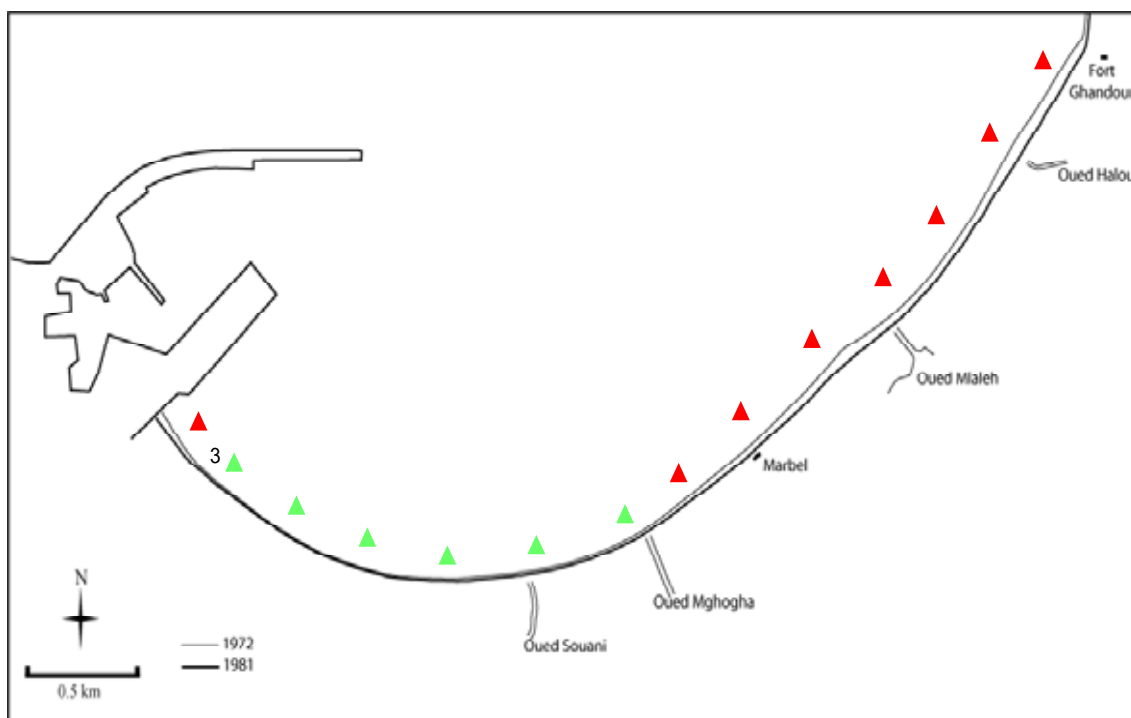


Figure 5. Évolution du trait de côte au cours de la période de 1972-1981. On distingue deux secteurs : le premier en érosion (rouge) et le deuxième stable (vert). On constate que la zone d'engraissement fait défaut. *Coastline changes during the 1972-1981 period. Two sectors can be distinguished: the first one in erosion (red) and the second stable (green). Note that the zone of accretion is absent.*

5.1.3. Évolution du trait de côte entre 1981 et 1997

Au cours de cette période, précisément en 1986, des travaux de protection ont été effectués pour freiner l'érosion. Ainsi, un brise-lames et deux épis ont été installés entre l'oued Mlaleh et le fort Ghandouri (figures 4 et 6). Pendant cette période, la situation d'avant 1972 s'est rétablie, c'est-à-dire qu'on rencontre de nouveau trois secteurs : un secteur en érosion à l'est, un secteur en accrétion à l'ouest et un secteur stable entre les deux premiers (figure 6).

Le secteur entre le môle du port et l'embouchure de l'oued Souani est en accrétion sur une longueur de 1,68 km. Le taux d'engraissement croît d'est en ouest et il varie de 1 m/an \pm 0,75, à l'embouchure de l'oued Souani, à 5,3 m/an \pm 0,75, au pied du môle.

De part et d'autre du canal de Mghogha, sur une longueur de 825 m, le trait de côte est stable (figure 6).

De part et d'autre du système de défense installé à l'est, le trait de côte est en érosion. À l'ouest du système, pratiquement entre Marbel et le premier épi, le taux d'érosion est de 1,15 m/an \pm 0,75. Entre l'épi 2 et le fort Gandouri, le taux d'érosion est de 1,5 m/an \pm 0,75. Entre les deux épis, la côte est stable ou en léger engraissement avec la formation d'un tombolo derrière la brise lame.

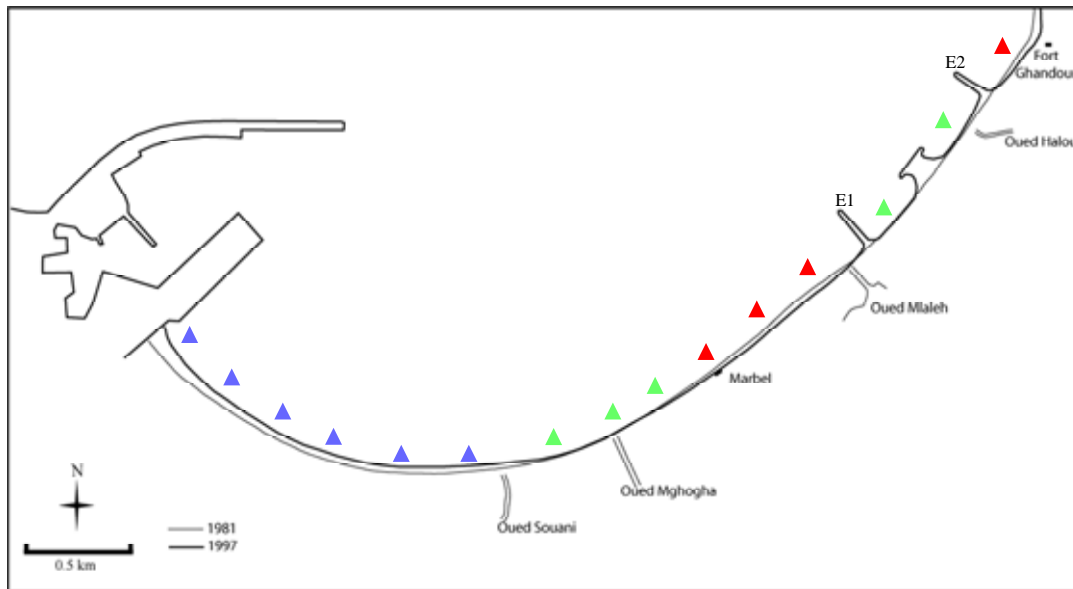


Figure 6. Entre 1981 et 1997, la situation sédimentologique s'est rétablie avec présence de trois secteurs : le premier en érosion (rouge), le deuxième stable (vert) et le troisième en engraissement (bleu). Après la construction du système de protection, la zone entre les épis E1 et E2 s'est stabilisée. *Between 1981 and 1997, the sedimentary situation is restored with the presence of three sectors: the first one in erosion (red), the second is stable (green) and the third in accretion (blue). After the construction of the breakwater, the zone between groynes E1 and E2 is stabilized.*

5.1.4. Évolution du trait de côte entre 1972 et 1997

En changeant l'échelle de temps, en comparant directement les données CORONA de 1972 aux photographies aériennes de 1997, soit sur une période de 25 ans, on observe que trois secteurs sont clairement identifiables (figure 7) : un secteur en érosion, un secteur stable et un secteur en accréation. Le premier secteur s'étend entre le point 1 et l'épi 1 d'un côté, et entre l'épi 2 et le fort Gandouri de l'autre côté. Le taux d'érosion moyen enregistré est de $2 \text{ m/an} \pm 0,48$. Le secteur stable s'étend du point (1) qui se situe à l'est du canal de Mghogha, au point (2) à l'ouest de l'oued Souani (figure 7). Le troisième secteur en accréation s'étend entre le point (2) et le môle du port sur une distance de 1,3 km. Le taux d'accréation y est en moyenne de $1,15 \text{ m/an} \pm 0,48$.

La surface totale perdue par érosion, pour l'ensemble de la grande plage de Tanger, au cours de cette période est de $88\,600 \text{ m}^2 \pm 7\,500$. Cette réduction doit avoir un impact direct sur le débit solide mobilisé par les vents venant de l'est à partir du secteur est, en érosion, vers le secteur ouest, en accréation. Le débit solide devra diminuer en fonction de la réduction de la surface d'alimentation. Si on tient compte de la surface immobilisée par les stations balnéaires qui se sont installées à l'est de la grande plage et dont la surface est estimée à $65\,000 \text{ m}^2$, la surface totale perdue est alors d'environ $150\,000 \text{ m}^2$.

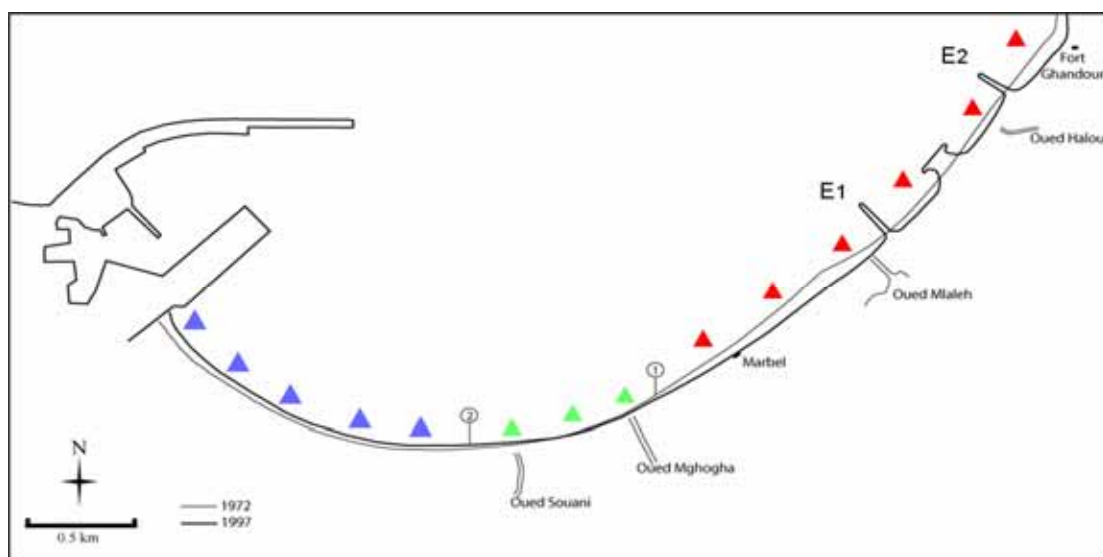


Figure 7. Évolution du trait de côte sur la période de 1972-1997. Trois secteurs se distinguent : le premier en érosion (rouge), le deuxième stable (vert) et le troisième en engraissement (bleu). *Coastline changes during the 1972-1997 period. Note the presence of three segments: the first one in erosion (red), the second is stable (green) and the third in accretion (blue).*

5.1.5. Évolution entre 1997 et 2006

Pour obtenir un ordre de grandeur sur la situation au cours de la période 1997-2006, nous avons d'abord identifié des points de contrôle sur les photographies aériennes de 1997 et calculé leur distance par rapport au trait de côte. Ensuite, ces points ont été reconnus et leur distance par rapport au trait de côte a été mesurée sur le terrain.

Les mesures sur le terrain ont concerné le secteur en érosion entre les oueds Souani et Mlaleh. Le taux d'érosion entre les oueds Mlaleh et Mghogha est de l'ordre de 2,7 m/an (figure 8) et entre les oueds Souani et Mghogha est de 1,7 m/an. Il faut mentionner que ce dernier tronçon était stable au cours de la période de 1972-1997 et, donc, que le secteur en érosion progresse vers l'ouest.

5.2. Zone de Borj

Le secteur de Borj est formé par la pointe de Borj et par la plage meuble de Borj ; cette dernière est une plage de fond de baie (*pocket beach*) et évolue séparément de la grande plage de Tanger (figure 2). Elle est alimentée par deux ravins actifs pendant la saison des pluies. La pointe de Borj est constituée par une falaise en recul (figures 2 et 9). Au-delà du secteur de Borj, aucune érosion significative n'a été détectée.

Au niveau de la pointe de Borj, le taux de recul de la falaise enregistré au cours de la période de 1981-1997 était de 1,5 m/an \pm 0,75 (figure 10), ce qui est très significatif pour une zone à falaise.



Figure 8. Érosion au niveau du secteur de Mghogha-Mlaleh. Disparition quasi totale de l'arrière plage sableuse. La falaise taillée dans les argiles constitue le trait de côte actuel. *Erosion of the Mghogha-Mlaleh segment. Almost total disappearance of the sandy beach. The cliff constitutes the current coastline.*

Photo prise en novembre 2006 par J.E. El Abdellaoui



Figure 9. Érosion de la falaise de Borj. Destruction du fort de Borj. *Erosion of the Borj cliff. Destruction of fort Borj.*



Figure 10. Photographie de 1981 de la zone à falaise de Borj. En rouge, le trait de côte de 1997. Le taux de recul de la falaise est de 1,5 m/an. *Aerial photograph (1981) of the Borj cliff. In red, the 1997 coastline. The cliff's rate of retreat is about 1,5 m / year.*

6. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

6.1. Analyse historique des aménagements de la baie de Tanger

À partir de la carte bathymétrique de 1855 (figure 11), on peut identifier quelques caractéristiques du système côtier de la baie de Tanger dans son état naturel. Dans la partie occidentale, un éperon rocheux naturel protège une plage de fond de baie au pied de l'ancienne ville de Tanger. De cet éperon rocheux s'étire, vers l'est, une plage meuble jusqu'au fort Ghandouri. Le trait de côte se caractérise par la présence d'un saillant triangulaire (figure 11). Ce dernier se forme quand il y a deux dérives de sens inverse (Paskoff, 1998). Il marque en quelque sorte un point d'équilibre entre deux zones de sédimentation.

Alors que le trait de côte actuel est entrecoupé par les embouchures de quatre oueds, sur les anciennes cartes bathymétriques et topographiques, ainsi que sur les photographies aériennes de 1958 et de 1963, on constate que trois des oueds (oueds Souani, Mghogha et Mlaleh) se regroupaient pour ne plus former qu'une seule embouchure à caractère estuarien, caractérisée par une zone marécageuse à chenaux multiples qui débouchait exactement au niveau du saillant triangulaire. Ce dernier présente donc le point d'équilibre entre les actions hydro-sédimentaires marines et continentales à l'intérieur de la baie. En effet, sur la côte de la baie de Tanger, les houles dominantes viennent de deux directions opposées : la houle d'est à nord-est et celle d'ouest à nord-ouest. Un équilibre hydro-sédimentaire s'établit entre les deux courants de dérive engendrés par ces houles. Ce système a vraisemblablement fonctionné depuis le Flandrien, comme en témoigne les sables coquillés datés du Flandrien et les argiles estuariennes occupant la zone entre les embouchures des oueds Mghogha et Mlaleh. L'aménagement de l'oued Mghogha et la déviation des oueds Souani et Mlaleh, à la suite de l'intense urbanisation, ont contribué à la rupture de l'équilibre hydro-sédimentaire côtier. Entre

1963 et 1967, les chenaux latéraux entre le canal de Mghogha et l'oued Mlaleh ont été remblayés. La géomorphologie littorale en a été ainsi profondément transformée.

D'autre part, les travaux d'expansion du port et la construction de la grande jetée, entre 1927 et 1933, ont fortement déstabilisé le transport sédimentaire dans la baie. En effet, les sables en provenance de l'ouest et amenés par le courant de dérive ont été bloqués derrière la jetée et ont formé une nouvelle plage sableuse. La houle d'ouest a été déformée par la grande jetée et le courant de dérive de l'ouest n'a pu mobiliser les sables de la partie occidentale de la grande plage. En conséquence, les sables transportés par le courant de dérive de l'est, s'y accumulent continuellement. Une belle plage s'est ainsi formée avec le temps.

Avec l'expansion du port, l'urbanisation de la ville de Tanger va se développer. Elle va se faire de façon préférentielle à partir de l'ancienne ville en direction de l'est, sur la bande côtière occidentale de la baie. L'expansion de la ville aura pour conséquence la fixation des champs de sables flandriens qui occupaient une large surface s'étendant du plateau de Marshan jusqu'à la baie, recouvrant ainsi une partie du versant ouest du bassin de Souani sur laquelle s'est construite la ville, soit une surface immobilisée de 4 km². Cette couche de sable atteignait une épaisseur de 2 m sur le plateau de Marshan et plus de 3 m au niveau des plaines côtières. Ce faciès sableux constituait une source d'alimentation de la plage en matériaux meubles. En effet, en période de crue, les eaux pluviales érodaient le sable et l'évacuaient vers la baie, soit par le lit de l'oued Souani, ou par des ravins qui débouchaient directement dans la baie, ce qui n'est plus le cas actuellement.

L'échange du sable entre l'avant pays et la plage se faisait entre autre par l'action des vents, notamment ceux de direction est à nord-est et ouest à sud-ouest. Les conséquences de cette action sur la géomorphologie littorale apparaissent nettement sur la carte de 1855 (figure 11), où on constate l'existence de deux systèmes dunaires, un à l'ouest de la baie et l'autre à l'est. Ces deux systèmes ont été rasés par les aménagements successifs de la zone bordière. Le système dunaire oriental a été détruit au cours des années soixante-dix, suite à l'installation de stations balnéaires sur l'arrière plage entre le Fort Ghandouri et l'oued Mlaleh. Ces aménagements ont survécu alors que la ligne de côte régressait de manière spectaculaire. Quelques années plus tard, les murs de protection (figure 4) qui ont été construits pour protéger ces nouveaux complexes hôteliers, se sont effondrés sous l'action des vagues.

Le système de défense, installé en 1986, qui est formé par deux épis et un brise-lames, a bel et bien stoppé l'érosion sur une zone assez limitée, mais le prix en a été considérable. En effet, l'embouchure de l'oued Halou, le seul cours d'eau qui alimentait la baie en graviers et galets, a été emprisonné entre le brise-lames et l'épi est. La charge sédimentaire apportée par l'oued, qui est assez précieuse pour une zone aussi vulnérable, ne sert plus à l'alimentation de la plage de Tanger. À l'est et à l'ouest de ce dispositif de défense, l'érosion a continué son avancée. La toute dernière source d'approvisionnement en sédiments a ainsi été rompue. Donc, à partir de 1986, toute perte en sable par érosion ne sera plus compensée, même partiellement. Les pertes en sable après la construction des ouvrages de défense sont estimées à 180 000 m³ sur 15 ans (Long *et al.*, 1999).

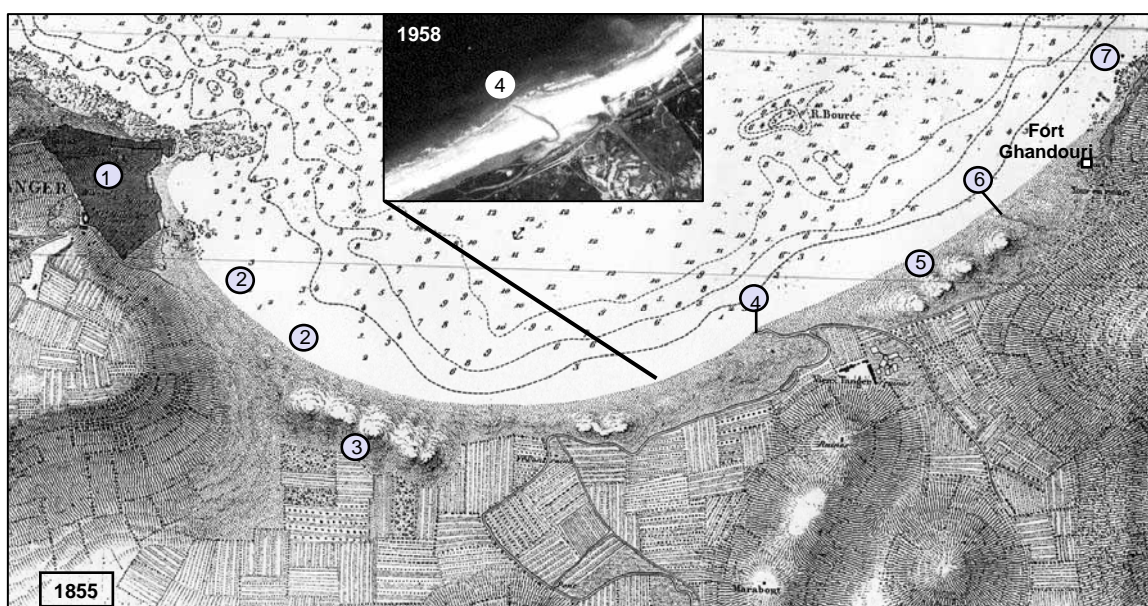


Figure 11. Carte bathymétrique de 1855. (1) Ancienne ville de Tanger ; (2) Plage de l'ouest ; (3) Système de dunes de l'ouest ; (4) Saillant triangulaire avec une seule embouchure regroupant les oueds Souani, Mghogha et Mlaleh. (4') Saillant triangulaire de 1958 ; (5) Système de dunes de l'est. *Bathymetric map of 1855. (1) Old city of Tangier ; (2) West beach ; (3) Western sand dune system ; (4) Triangle shape with a single estuary for Oueds Souani, Mghogha and Mlaleh. (4') Triangle shape (formation identified on 1958 photograph) ; (5) Eastern dune system.*

6.2. Analyse diachronique

L'érosion généralisée de la plage de Tanger, enregistrée entre 1972 et 1981, peut avoir deux causes probables : une cause naturelle et une cause anthropique. Les deux causes ont fort probablement joué ensemble. La cause naturelle est due à l'action des tempêtes, qui sont fréquentes à Tanger. Des éléments de cette action sont apparents sur les photographies d'août 1981, où on observe l'effet de l'action des vagues sur le profil de la plage. L'ados de plage est bien marqué par un changement brutal de la pente (microfalaise) et par des niches d'arrachement (figures 4 et 8). En effet, l'analyse des vents de 1981 montre que le mois de juillet a connu de très forts vents venant de l'est. Sur 12 jours, la force moyenne quotidienne du vent était supérieure à 40 km/h et, sur 7 jours, elle a dépassé 54 km/h. La force du vent maximal quotidien a été supérieure à 58 km/h pendant 17 jours et à 72 km/h pendant 11 jours ; elle a même une fois atteint 104 km/h. Dans le premier cas (supérieure à 58 km/h), le vent a soufflé le double du nombre de jours moyen calculé sur la période 1971-2000, qui est de 8,2 jours. Ces valeurs montrent que la série de tempêtes du mois de juillet 1981 est exceptionnelle. De telles tempêtes sont susceptibles d'engendrer des transferts transversaux notables, capables d'influencer de manière durable l'évolution d'un littoral (Durand, 2001).

La deuxième cause est anthropique. En effet, au cours de l'année 1980, il y a eu expansion du môle du port, soit une augmentation de la surface du quai de 3 ha. Le sable utilisé pour réaliser cette expansion a été prélevé directement sur l'estran, au pied de môle. L'extraction excessive du sable sur une courte période a déstabilisé l'équilibre sédimentaire à l'ouest de la baie. La fragilisation du système a rendu son attaque plus efficace par les houles d'est et de nord-est. Ce changement du relief à l'aval a déstabilisé celui qui est en amont et le transfert sédimentaire s'est accéléré pour remettre le système en équilibre, d'où un taux d'érosion relativement élevé. Le sable mobilisé par la dérive littorale engendrée par la houle est a été consommé pour la cicatrization de la zone ouest. Cette situation a fragilisé la plage ouest lors des tempêtes, ce qui explique la situation de recul généralisée de 1981 (figure 4).

Au cours de la période de 1981-1997, on constate que l'érosion a ralenti avec des taux de 1 à 1,5 m/an, qui sont largement inférieurs à la moyenne de 2 à 3 m/an enregistrée pour la période de 1950-1972. Ce ralentissement s'explique par l'action de cicatrization de la situation engendrée en 1981. Ceci est clairement observable sur les photographies aériennes de 1987 (4 ans après), où on note un léger engraissement par rapport au trait de côte de 1981 au niveau du segment Marbel-Oued Mlaleh. Ce dernier est normalement en érosion. Il s'agit ici d'un rétablissement du profil « moyen » de la plage.

Pour la période de 1972-1997, on constate que le taux d'érosion moyen de la zone orientale est égal à celui qui est calculé pour la période de 1950-1972. Par contre, le taux d'engrangement du secteur occidental est inférieur à la moyenne à cause de la forte érosion qui a sévi dans cette zone au cours des années 1980-1981.

À partir des résultats obtenus, on constate que la précision de l'information sur le déplacement du trait de côte, extraite par la méthode diachronique, dépend étroitement de la période de référence entre les dates d'acquisition des documents sur lesquels on se base. La tendance moyenne du déplacement du trait de côte est d'autant plus représentative que la période est longue. Mais, dans ce cas, les forçages sont considérés comme temporellement constants. Les variations du trait de côte sous l'impact des événements exceptionnels, telles les tempêtes, ne sont pas alors observables, ce qui revient à négliger le temps de rétablissement du profil de plage. La perte de l'information sur la dynamique du trait de côte, les processus hydrosédimentaires et les forçages qui en sont à l'origine, pourraient conduire à des interprétations imprécises. Si le calcul de l'érosion sur une courte période accroît la valeur de l'erreur annuelle commise, il a l'avantage de mieux identifier les discontinuités du trait de côte. Ce constat montre que la vitesse d'évolution n'est pas constante et permet, par conséquent, une meilleure analyse des facteurs qui contrôlent la dynamique du trait de côte.

6.3. Érosion de la falaise de la pointe de Borj

L'évolution des falaises dépend des caractéristiques du substratum rocheux (lithologie, structure de la roche et état de fracturation), d'une part, et des processus marins et continentaux en jeu, d'autre part. Ces derniers dépendent des caractéristiques des houles et des conditions météorologiques. Le rapport de force entre ces processus varie dans l'espace et dans le temps. Il se traduit dans le profil des escarpements et influence les modalités ainsi que la vitesse du recul des falaises (Ottman, 1965 ; Summerfield, 1991 ; Paskoff, 1998 ; Hénaff *et al.*, 2002).

La côte à falaise de la baie de Tanger est principalement formée par des roches argilo-marneuses contenant des couches centimétriques à décimétriques de grès ou de calcaire. Ces dernières, très fracturées, contribuent de manière significative à l'alimentation des plages par des galets et des blocs. Les galets, quand ils sont présents, sont repris par l'action des houles et forment des cordons qui protègent le pied de la falaise. Par contre, leur prélèvement illicite facilite l'attaque du pied de la falaise et donc son recul. L'action des vagues sur le pied des falaises argilo-marneuses, notamment en période de tempête, conjuguée avec l'action de l'eau météorique, provoque une érosion en masse qui déstabilise de manière continue les falaises.

Le recul de la falaise se fait notamment en période de tempête alors que le vent, exerçant une contrainte de cisaillement à la surface de l'eau, provoque le déplacement de la masse d'eau superficielle dans la même direction, ce qui rend l'attaque de la falaise plus agressive. La situation devient encore plus critique pendant les périodes pluvieuses car l'engorgement des marnes et des argiles gonflantes par l'eau déclenche des mouvements de masse, notamment en

absence du couvert végétal. C'est donc la conjugaison des facteurs climatiques et géologiques qui contrôle le recul de la falaise en cette zone.

Si l'obliquité des houles du nord-ouest ne permet pas la création d'un courant de dérive significatif à l'est de la baie, l'énergie des ondes est conservée et provoque un effet d'arrachement en attaquant de plein fouet la falaise. En période de tempête, les forts courants de retour sont responsables d'un transport de sédiments vers le large. L'érosion de la falaise de la pointe de Borj est une conséquence de l'adaptation géomorphologique d'une zone qui se situe entre deux secteurs en forte érosion : la plage de Ghandouri à l'ouest et la plage de Borj à l'est. Cette dernière a été fortement érodée comme on peut le constater sur les photographies aériennes et le montre le profil de la plage très pentu. L'origine probable de l'érosion de la plage de Borj réside en bonne partie à la prise excessive du sable et des galets, notamment après l'interdiction de l'extraction de la plage de Ghandouri en 1966 (témoignage d'un ex-exploiteur du sable) et la construction d'une route goudronnée qui amène vers la plage de Borj, ce qui a facilité l'accès aux camions et donc à l'extraction illicite.

En 2006, les travaux d'aménagement du versant du fort Ghandouri ont déstabilisé le versant de Borj. En effet, en réalisant une tranchée au niveau de l'ancienne falaise, le profil de cette dernière est devenue plus raide et le risque de glissement a été augmenté, ce qui s'est répercuté sur l'ensemble du versant. L'action des processus subaériens est devenue ainsi plus efficace.

7. CONCLUSION

L'analyse historique a permis la reconnaissance du système côtier dans son état naturel et le suivi de sa transformation en fonction des aménagements successifs. Il en ressort que les caractéristiques géomorphologiques du système côtier permettent un équilibre sédimentaire contrôlé par l'action de deux dérives opposées, par les apports fluviaux et par l'action éolienne. Cet équilibre a été rompu à cause d'une succession de travaux d'aménagement. En premier lieu, à cause de la construction du port, qui a intercepté le transit littoral engendré par la houle venant d'ouest (Lafond, 1952), en deuxième lieu, à cause de l'immobilisation des sables tapissant le versant ouest de l'oued Souani et enfin, à cause du blocage, par le système de défense de 1986, des sables et galets apportés par l'oued Halou, lesquels constituent la toute dernière source d'alimentation. La déstabilisation du système sédimentaire par l'humain est aggravée par l'appauvrissement du stock sédimentaire mis à disposition dans la baie, cette dernière évoluant en système fermé.

L'étude diachronique, basée sur les photographies aériennes des missions de 1972, 1981 et 1997, a permis la quantification de l'érosion linéaire sur une période de 25 ans. Il en ressort que les taux d'érosion et d'engraissement ont varié entre 1972 et 1997. Ainsi, l'examen des photographies aériennes de 1981 montre un recul exceptionnel du trait de côte qui a affecté la totalité de la plage. Le secteur de l'ouest, qui s'engraissait avec un taux de 3 à 5 m/an, se stabilise pendant la période de 1972-1981. Dans le secteur de l'est, on enregistre une accélération de l'érosion avec un taux moyen de 4 m/an. Sur la période de 1981-1997, l'effet de cicatrisation se répercutera sur le taux d'érosion qui est au-dessous des valeurs moyennes. Ainsi, le taux d'érosion y est de 1 à 1,5 m/an alors que le taux moyen est de 2 à 3 m/an.

Actuellement, l'érosion, qui puisait des sédiments de la plage de l'est pour engraisser celle de l'ouest, ne trouve plus de matériaux à la suite de l'érosion et de l'occupation humaine quasi-totale de l'arrière plage. Un nouvel épisode de l'histoire de la baie est entamé. Comme la plage de l'ouest n'est plus alimentée par les sédiments acheminés par la dérive venant de l'est, sa vulnérabilité augmente progressivement. Dans un premier temps, le taux d'engraissement devra diminuer progressivement à la suite de l'épuisement des réserves orientales. Par la suite la cicatrisation de la plage, à la suite des tempêtes successives comme celles de 1981, se fera de plus en plus difficilement. La zone stable de la grande plage va ainsi migrer progressivement en direction de l'ouest. Le courant de dérive venant de l'est attaquera cette partie de plage, pour éventuellement rétablir l'équilibre de l'ouest de la plage. Cette réalité est déjà ressentie entre les oueds Souani et Mghogha. Les complexes balnéaires qui se sont installés au niveau de cette dernière zone sont en sursis à moyen terme si des mesures adéquates ne sont pas prises.

Enfin, à l'est de la baie, la côte à falaise, considérée comme stable dans les études précédentes, s'érode considérablement au niveau du secteur de Borj, ce qui déstabilise le versant, notamment avec les travaux d'aménagement récents.

Remerciements

Les auteurs remercient la Direction de la Météorologie Nationale du Maroc pour les données de vents.

Références

Boughaba, A. (1992) Les littoraux meubles septentrionaux de la péninsule de Tanger (Maroc). Géomorphologie et effet de l'intervention anthropique sur leur environnement. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 348 p.

- Durand, P. (2001) Érosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 1, p. 55-68.
- Gaillot, S. et Chaverot, S. (2001) Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas de Calais) en France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 1, p. 47-54.
- Gobert, D., Ozer, A. et Cornet, Y. (1996) Étude diachronique de 1948 à 1990 de l'évolution du littoral des plages de Monza et d'Ablo (cap de Corse) par traitement analogique de photographies aériennes. *Photo-interprétation*, n° 1996/1, p. 49-57.
- Grenier, A. et Dubois, J.M.M. (1990) Évolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. *Photo-interprétation*, n° 1990/6, p. 3-16.
- Hénaff, A., Lageat, Y., Costa, S. et Plessis, E. (2002) Le recul des falaises crayeuses du Pays de Caux : détermination des processus d'érosion et quantification des rythmes d'évolution. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 2, p. 107-118.
- Humbert, M. (1971) Carte géotechnique de Tanger : Géologie et géomorphologie. Notes Service géologique du Maroc n° 222, p. 31-43.
- Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1972) Baie de Tanger : A. Rapport de l'étude théorique sur documents. Ministère des Travaux publics et des communications, Rabat (Maroc), 51 p.
- Lafond, R.-L. (1952) Les phénomènes littoraux dans la zone internationale de Tanger. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 8, p. 675-670.
- Long, B.F., Bencheikh, L., Karakiewicz, B. Merzouk, A. et Romanczyk, W. (1999) Réhabilitation de la plage de Tanger par rechargement du haut de plage entre Ghandouri et le port. Direction des ports et du domaine public maritime, Rabat (Maroc), 19 p.
- Ottman, F. (1965) Géologie marine et littorale. Masson et C^{ie}, Paris, 185 p.
- Paskoff, R. (1998) Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. 3^e édition, A. Colin, Paris, 257 p.
- Robin, M. (2002) Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. *In* Le littoral : regards, pratiques et savoirs. Éditions Rue d'Ulm /Presses de l'École normale supérieure, Paris, 230 p.
- Summerfield, M. A. (1991) *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Longman, John Wiley & Sons, New York, 509 p.
- Thauvin, J.P. (1971) Carte géotechnique de Tanger : Le climat à Tanger. Notes du Service géologique du Maroc n° 222, p. 29-38.