

Répartition des faciès sédimentaires récents en milieu marin côtier : exemple des baies de Tanger (NW-Maroc) et de Cadix (SW-Espagne) *

Mohammed ACHAB¹, Bouchta EL MOUMNI², Abdelkrim EL ARRIM²
& Jose Manuel GUTIERREZ MAS³

1. Université Mohammed V-Agdal, Institut Scientifique, Département de Géomorphologie et de Cartographie, B.P. 703, Rabat, Maroc. e-mail : achab@israbat.ac.ma

2. Université Abdelmalek Essaâdi, Faculté des Sciences et Techniques, Département des Sciences de la Terre, Groupe GOEM, B.P. 416, Tanger, Maroc.

3. Universidad de Cadiz, Facultad de Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Apartado 40, 11510 Puerto Real (Cadiz), Espagne.

Résumé. Une étude sédimentologique des dépôts superficiels des baies de Tanger et de Cadix a été réalisée dans le but de déterminer, d'une part, les caractéristiques granulométriques et minéralogiques et, d'autre part, les facteurs de contrôle de la distribution et le transport des sédiments. Dans la baie de Tanger, deux secteurs sont distingués : un secteur oriental, à prédominance de faciès sableux, et un secteur occidental caractérisé par des sédiments fins. Le cortège minéralogique est constitué principalement par le quartz, la calcite, la kaolinite et l'illite. Leur origine est essentiellement détritique. La dynamique sédimentaire récente est contrôlée par les courants engendrés par les houles du secteur NW et les vagues du NE. Dans la baie de Cadix, deux secteurs ont été distingués : la baie externe, caractérisée par des sédiments grossiers, et la baie interne, à prédominance de faciès vaseux. L'analyse minéralogique montre la prédominance du quartz, de la calcite et de l'illite. La dynamique sédimentaire récente est contrôlée principalement par les courants de marée, en particulier les courants de jusant, qui sont responsables de la distribution et du transport des sédiments fins de la baie interne vers la baie externe.

Mots-clés : Maroc, Espagne, océanographie, sédimentologie, baie de Tanger, baie de Cadix, sédiments marins meubles, dynamique sédimentaire.

Abstract. Distribution of recent sedimentary facies in coastal marine environments: example of Tanger (NW-Morocco) and Cadix (SW-Spain) bays. Sedimentological study of surface sediments of Tanger and Cadix bays was carried out, with the aim of determining the granulometric and mineralogical characteristics, and factors controlling the distribution and the transport of sedimentary facies. In Tanger bay, two sectors are distinguished: the eastern one, with prevalence of sandy facies, and the western sector, characterized by fine sediments. The mineralogical assemblage is made up mainly by quartz, calcite, kaolinite and illite of detrital origin. Recent sedimentary dynamics is controlled by NW swells and NE wave currents. In the bay of Cadix, two sectors have been differentiated: the external bay, characterized by coarse sediments, and the internal bay, with predominance of muddy facies. Mineralogical analysis shows the prevalence of quartz, calcite and illite. The recent sedimentary dynamics is mainly controlled by tidal currents, in particular the ebb flow. These are responsible for the distribution and transport of fine sediments from the inner bay toward the outer bay.

Key-words: Morocco, Spain, oceanography, sedimentology, Tanger bay, Cadix bay surface marine sediments, recent sedimentary dynamics.

INTRODUCTION

Les baies de Tanger et de Cadix constituent deux entités sédimentologiques côtières de grande importance hydrodynamique et sédimentaire, en raison de leur position géographique particulière de part et d'autre du détroit de Gibraltar, lieu d'échanges entre l'Atlantique et la Méditerranée.

Les études granulométriques et minéralogiques des sédiments de surface des baies de Tanger et de Cadix ont fait l'objet de nombreux travaux récents, principalement par Boughaba (1992), El Arrim (2001), El Hatimi *et al.* (2002), El Bouzidi *et al.* (2004) sur la baie de Tanger, et par Gutiérrez-Mas *et al.* (1996 et 1999), Achab (2000) et Achab *et al.* (1999b, c; 2002 et 2003) sur le golfe et la baie de Cadix. Des études sédimentologiques similaires ont été réalisées au Maghreb, en particulier sur le Golfe de Tunis (El Arrim 1996), la baie d'Alger (Maouch 1987), la baie d'Al Hoceima (Gensous & Tesson 1979), et sur la marge méditerranéenne marocaine (El Moumni 1987, 1994 parmi d'autres). En Europe, des travaux similaires ont été menés sur le golfe du Lyon (Aloisi *et al.* 1975), la baie de Fort-en-France (Pons *et al.* 1991), la baie du Mont-Saint-Michel (Larsonneur 1989) et dans les rias de Vigo et de Ferrol en Espagne (Nombela 1989 et Olabarria *et al.* 1996).

Le présent travail est une étude comparative pluridisciplinaire de la dynamique sédimentaire récente

dans les baies de Tanger et de Cadix. Il traite aussi les processus et les mécanismes de transport des sédiments récents, ainsi que les facteurs de contrôle de la distribution des faciès granulométriques.

CARACTERISTIQUES GENERALES

Contexte géographique et géologique

Baie de Tanger

La baie de Tanger est située à l'extrémité nord-occidentale du Maroc, sur la rive méridionale du détroit de Gibraltar, entre 35° 46' et 35° 48' N et 5° 45' et 5° 49' W. Elle représente la partie maritime d'une dépression creusée entre deux pointes rocheuses qui s'ouvrent sur le détroit de Gibraltar : le Cap Spartel à l'ouest, et le Cap Malabata à l'est (Fig. 1).

Trois grandes unités géomorphologiques peuvent être distinguées (El Gharbaoui 1981) : (i) le massif gréseux de Jbel el Kebir à l'ouest (200 m) ; (ii) la plaine vallonnée du Fahs au centre (100 m), à matériel essentiellement argilo-marneux ; et (iii) les massifs d'Anjera à l'est, qui présentent des reliefs accusés (200 à 400 m) constitués de marnes calcaires.

Sur le plan géologique, la baie de Tanger représente le prolongement septentrional du Domaine externe de la zone des nappes du système rifain. La géologie de l'arrière-pays se caractérise par l'empilement de quatre nappes de

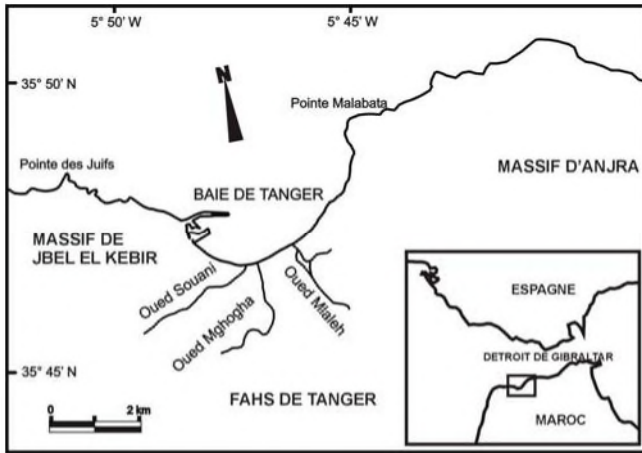


Figure 1. Carte de situation géographique de la baie de Tanger.

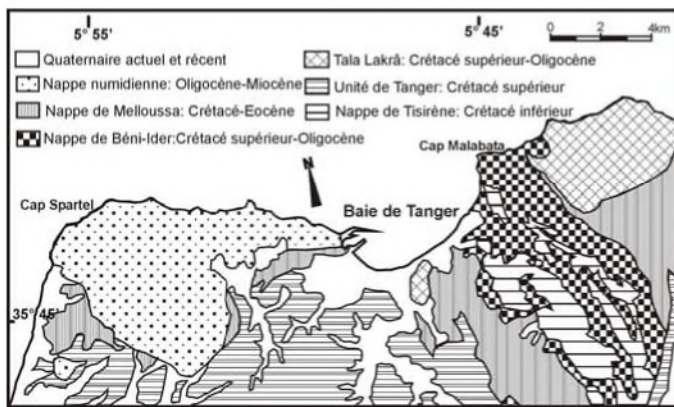


Figure 2. Carte géologique de l'arrière-pays du littoral tangerois (SECEG/SNED 1990, modifiée).

flyschs qui reposent sur l'unité de Tanger (Fig 2) : Melloussa, Béni-Ider, Tisirène et la nappe numidienne (Humbert 1971, Didon *et al.* 1984 et Hoyez 1989).

Baie de Cadix

Située au sud-ouest de la Péninsule ibérique, la baie de Cadix occupe la partie centrale du golfe de Cadix, entre 36° 25' et 36° 38' N et 6° 09' et 6° 18' W (Fig. 3). Elle est ouverte sur l'océan Atlantique, séparée de la mer Méditerranée par le détroit de Gibraltar, et limitée au nord par le Massif ibérique et au sud par les Cordillères bétiques.

La baie de Cadix s'étend sur une superficie totale de 760 km², où différents milieux de sédimentation y sont distingués (Fig. 3) : (i) au nord, la baie externe, qui communique avec le domaine marin ouvert jusqu'à 25 m de profondeur ; (ii) au sud, la baie interne, qui est un système lagunaire en voie de colmatage, protégé des courants de l'ouest par le cordon dunaire unissant la ville de Cadix avec le sud de la baie. Au sud de la baie interne, la zone des marécages, est sillonnée par un réseau de chenaux de marée, qui permettent le renouvellement des eaux et la communication avec le domaine marin proprement dit.

La côte atlantique de Cadix est orientée globalement NNW-SSE, avec des secteurs d'orientation E-W (Fig 4A). Cette orientation est contrôlée structuralement par une série de failles et de diaclases qui affectent aussi bien le domaine continental que le domaine marin (Gracia *et al.* 1999,

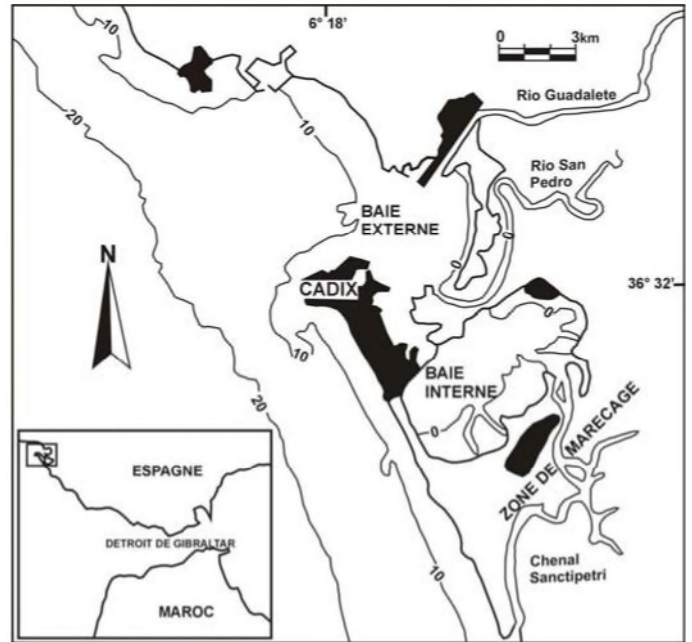


Figure 3. Carte de situation géographique de la baie de Cadix.

Achab & Gutiérrez-Mas 1999a, et Gutiérrez-Mas *et al.* 2003). Ces structures néotectoniques ont conditionné aussi la mise en place des milieux de dépôts marins et continentaux, la position de l'embouchure de certaines rivières et la dynamique sédimentaire récente dans la baie de Cadix.

Les formations géologiques qui constituent la majeure partie de la baie (aussi bien immergées qu'émergées), sont d'origine sédimentaire, et d'âge plio-quadernaire. Elles sont constituées par des grès et des conglomérats pliocènes et des sables rouges pléistocènes (Fig. 4B). Les matériaux holocènes sont constitués par la vase des zones de marais, les sables des plages et les dépôts continentaux (Zazo *et al.* 1983, Dabrio *et al.* 2000 et Achab 2000).

Contexte hydrologique et hydrodynamique

Baie de Tanger

La zone de Tanger est caractérisée par une pluviométrie moyenne annuelle de 800 mm. La baie accueille un réseau hydrographique assez dense, constitué par quatre oueds temporaires principaux qui sont d'est en ouest (Fig 5) ; oued Chatt, oued Mlaleh, oued Mghogha et oued Souani. Le débit solide annuel de l'ensemble des oueds débouchant dans la baie est estimé entre 60 000 et 70 000 t/an, dont 5 000 à 10 000 m³ de sables, graviers et galets (L.C.H.F. 1972, Long 1998).

Du point de vue hydrodynamique, les houles proviennent essentiellement de deux secteurs. Les houles du secteur, de direction ouest à NW proviennent de l'Atlantique et sont prédominantes au large de la baie. Les périodes sont de l'ordre de 9 et 12 s avec une amplitude de 2 m. Après réfraction, les houles du NW atteignent la baie perpendiculairement à la côte ; la diffraction de ces houles crée un courant latéral responsable du transport des sédiments vers l'ouest de la baie (L.C.H.F. 1974). Les houles du second secteur, de direction est à NE, sont dues à des mers de vent locales, caractérisées par des périodes

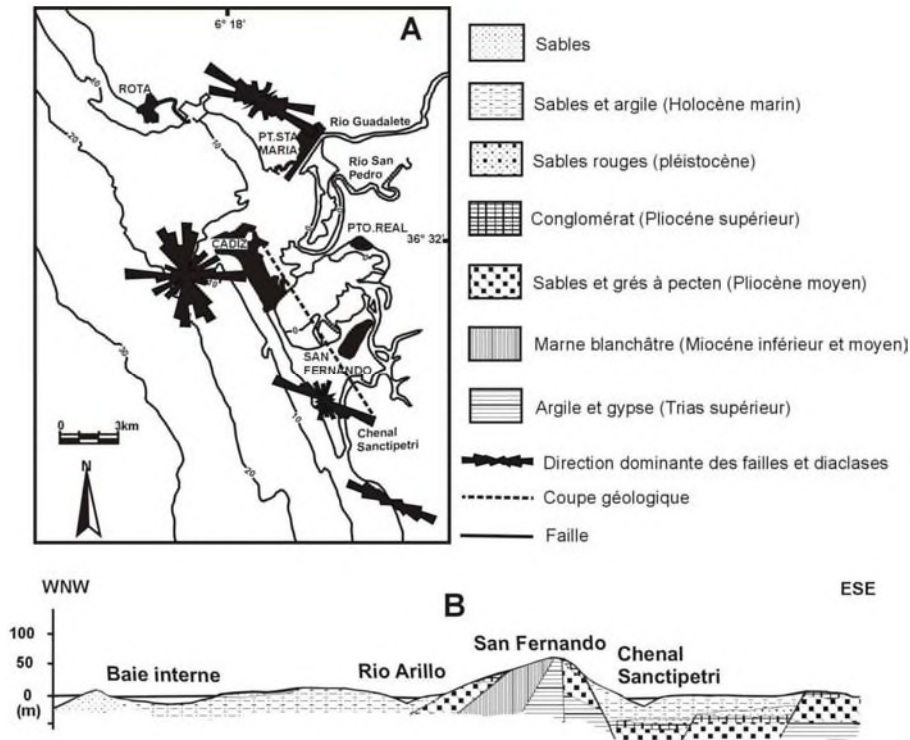


Figure 4. A, directions dominantes des failles et diachases affectant les affleurements plio-quaternaires et pléistocènes qui bordent le littoral de Cadix ; B, coupe montrant les principales formations géologiques qui constituent la baie de Cadix.

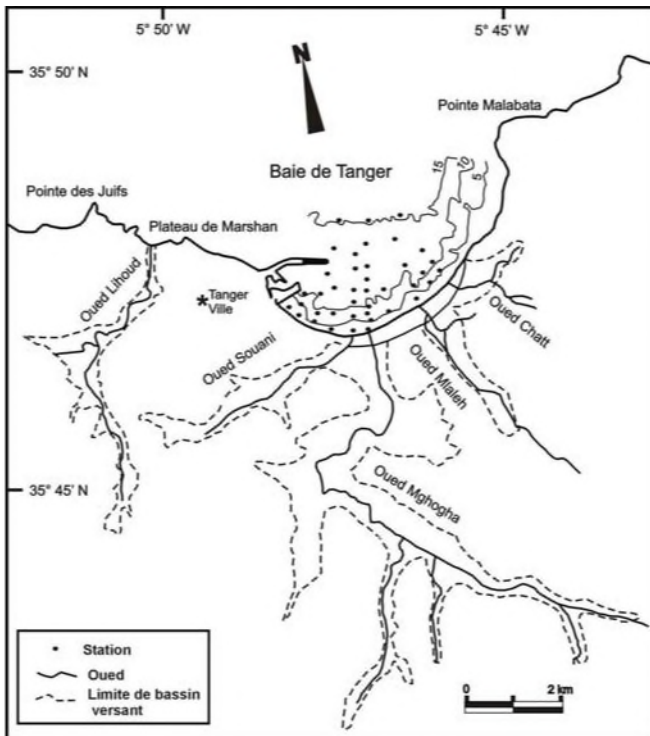


Figure 5. Carte de la position des prélèvements dans la baie de Tanger.

Courtes, de 3 à 5 s, et des hauteurs inférieures à 1,5 m. Ces houles attaquent le littoral à l'est de la baie avec une incidence de 20° à 30°, engendrant un transfert latéral de l'est vers l'ouest. La marée est de type semi-diurne avec une amplitude moyenne de 1,8 m. Le marnage des vives-eaux est de 2,2 m et celui des mortes-eaux est de 0,8 m (L.C.H.F. 1974, Long 1998).

Baie de Cadix

La plupart des apports fluviaux qui atteignent la baie de Cadix proviennent des rivières et de chenaux de marée à importance variable. Ces derniers se caractérisent par une décharge variable, liée au caractère irrégulier du régime des précipitations dans les bassins versants. Les principales sources d'apport des sédiments à la baie sont Rio Guadalete, Rio San Pedro et le chenal de Sanctipetri (Fig. 6). Lors des périodes de crue, d'autres émissaires constituent une importante source d'apport de sédiment.

Du point de vue hydrodynamique, la baie de Cadix subit l'influence du régime des houles du secteur ouest et SW (mers de fond), et du régime des vagues du secteur est et NE (mers de vent locales) (MOPT 1992). La zone de Cadix se caractérise par des vents forts qui agissent comme agent d'érosion et de transport des particules. Le modèle général de circulation des vents présente deux directions principales. Les vents humides soufflant de l'ouest, qui proviennent de l'Océan atlantique et sont humides. La composante NW et WNW produit des vagues avec long *fetch* et favorise le transport des sédiments vers le SE dans le sens de la dérive littorale, tandis que la composante SW et WSW produit des vagues responsables de l'érosion des plages et du cordon dunaire (Benavente 1997). Les vents de direction est et ESE proviennent du continent et sont secs. En présence des courants de marée, ces vents favorisent la remise en suspension des fonds peu profonds de la baie interne et des chenaux de marais, ainsi que de la zone des marécages. La marée est de type semi-diurne, caractérisée par une amplitude moyenne de 2,2 m (mesotidal). Les courants de marée, en particulier les courants de jusant présentent une grande importance dans la dynamique sédimentaire de la baie, puisqu'ils provoquent la remise en

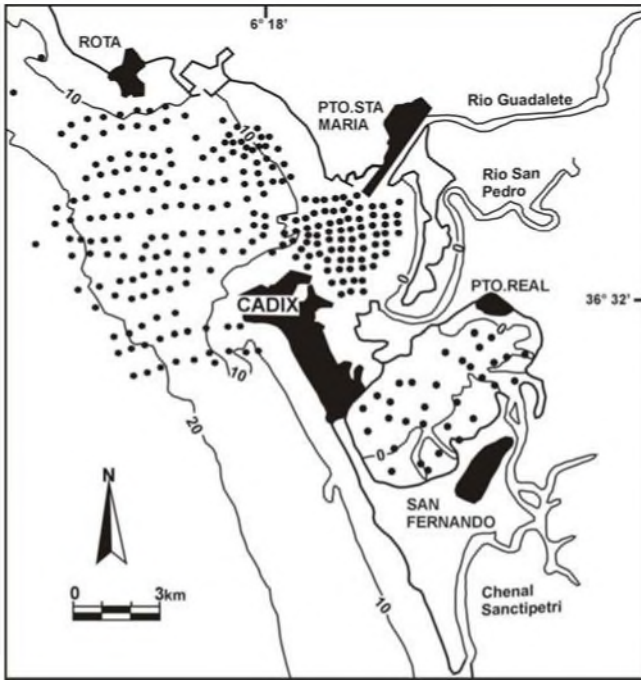


Figure 6. Carte de la position des prélèvements dans la baie de Cadix.

suspension des sédiments décantés lors de l'étalement de pleine mer.

MATERIELS ET METHODES

Pour la baie de Tanger, l'échantillonnage des sédiments de surface a été réalisé en deux missions (juillet et octobre 1999) à bord du N/O « ELDA », à l'aide d'une benne Shipek. Quarante et un prélèvements ont été effectués selon des radiales orientées N-S (Fig. 5). Le positionnement a été réalisé à l'aide d'un GPS à bord. Dans la baie de Cadix, l'échantillonnage des sédiments de surface a été réalisé en plusieurs missions (de 1994 à 1999) à bord du N/O "TARTESOS I" et "TARTESOS II" de l'Université de Cadix. Un total de 300 échantillons de sédiments meubles ont été prélevés à l'aide d'une benne de type Van Veen (Fig. 6). Les stations ont été positionnées avec un GPS.

L'analyse granulométrique a été réalisée par tamisage mécanique à sec sur une série de tamis de type AFNOR sur la fraction grossière (>63 µm) pendant 15 min. L'analyse minéralogique du sédiment brut (poudres) et de la fraction argileuse (<2 µm), à partir des dépôts orientés sur lames minces, a été réalisée en utilisant un diffractomètre Philips 1729 et 1830 à anticathode de cuivre (radiation K α). Les cartes de distribution des faciès granulométriques ont été dressées en se basant sur la classification de Folk (1974).

RESULTATS ET DISCUSSION

Faciès granulométrique et minéralogique

La taille des grains des sédiments dépend de nombreux facteurs, dont la composition minéralogique des particules détritiques et leur histoire d'érosion et de transport entre autres. La combinaison de ces facteurs donne lieu à des dépôts de particules de nature et de distribution

granulométrique variables (Nombella *et al.* 1987, Gao & Collins 1994, et Olabarria *et al.* 1996).

Baie de Tanger

Les sédiments superficiels de la baie de Tanger, généralement de nature silico-clastique, sont constitués par des sables de taille variable. Les carbonates sont presque exclusivement calcitiques. Leurs teneurs, généralement variables, montrent une évolution croissante du rivage (11%) vers le large de la baie (23%) où les débris organogènes à test carbonaté contribuent à cette augmentation (El Arrim *et al.* 2002). L'analyse granulométrique des sédiments de surface montre la présence de trois principaux faciès (Fig. 7) :

- Un faciès sableux, caractérisé par des teneurs en sable supérieures à 70%. Ce faciès occupe une bande parallèle à la côte, longue de 1,5 km vers le SW, qui peut se prolonger jusqu'à 15 m de profondeur. Il est également caractérisé par la présence d'auréoles de sable vaseux, dont la plus importante est située en face de l'embouchure de l'oued Mlaleh, à des profondeurs qui ne dépassent pas 7 m. Les autres auréoles apparaissent sur des fonds compris entre 10 et 15 m. Les fonds rocheux sont également présents dans la zone côtière située entre 1 et 10 m.

- Un faciès vaseux, avec des teneurs en sable inférieures à 35%. Il est situé en face des embouchures des oueds Souani et Mghogha, et constitue ainsi la vasière interne en relation avec les apports de ces oueds. Ces vases peuvent atteindre des profondeurs de 10 m, constituant ainsi la vasière externe, lieu favorable de la décantation des matériaux provenant des émissaires continentaux.

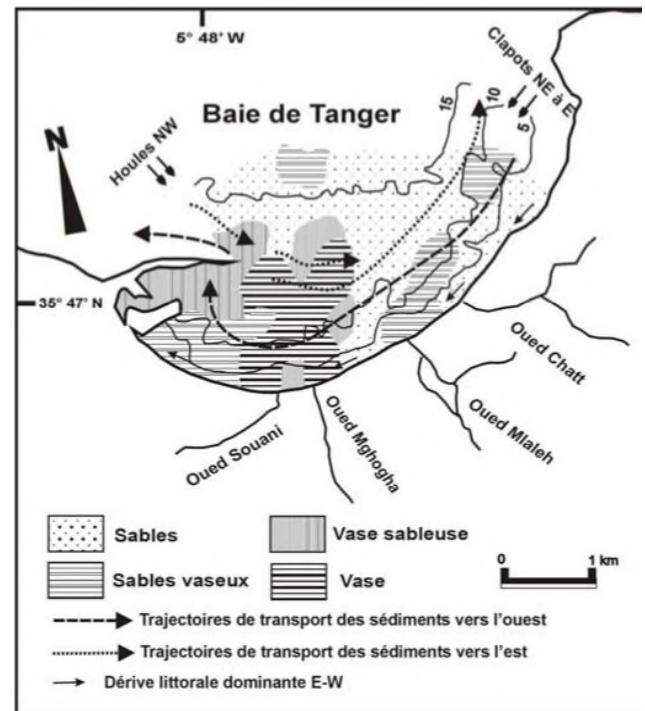


Figure 7. Carte des faciès sédimentaires et trajectoires de transport de sédiments dans la baie de Tanger.

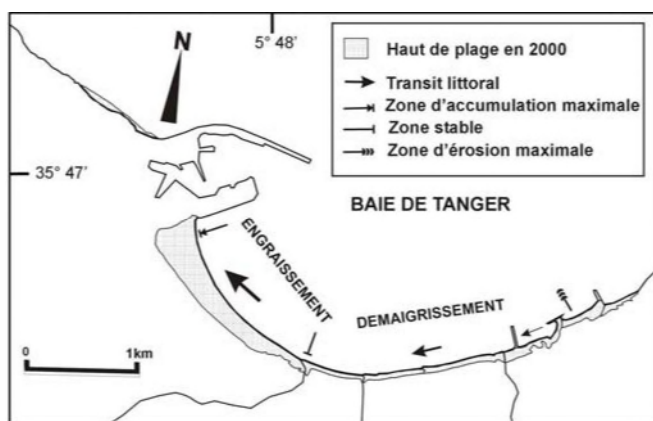


Figure 8. Morphodynamique des plages de la baie de Tanger : bilan érosion-accumulation de sables.

- Un faciès mixte constitué par un mélange de sable et de vase dont la teneur en sable est comprise entre 30% et 70%. Ce type de faciès caractérise la zone occidentale de la baie, généralement abritée de la houle du NW et apparaît en tant que sable vaseux et vase sableuse. La répartition du sable le long de la côte de la baie de Tanger met en évidence deux sections de plage (Fig. 8), la première, s'étendant de O. Mghogha jusqu'au port, est formée de sables fins modérément classés ; la deuxième, qui va de O. Mghogha jusqu'à la pointe de Malabata, est constituée de sables moyens, bien à très bien classés (El Arrim *et al.* 2003).

L'analyse minéralogique du sédiment brut montre que le quartz est le minéral le plus abondant (Fig. 9). Il est présent avec des pourcentages moyens de 60%. Ce minéral proviendrait des apports détritiques des oueds qui débouchent dans la baie, particulièrement O. Mghogha, O. Mlaleh et O. Souani, ainsi que de l'érosion des sables oligo-miocènes du Cap Malabata. Les autres minéraux identifiés sont la calcite (23%), de nature clairement biogénique, les feldspaths et la dolomite en faible quantité (1 à 5%). L'étude minéralogique des argiles montre quatre minéraux essentiels (Fig. 10) : l'illite (38%), la chlorite (33%), la kaolinite (23%), et la smectite (18%). La proportion de smectite est relativement forte, pouvant atteindre localement 38% à proximité immédiate de l'embouchure d'oued Mghogha. Ces minéraux ne subissent pas de variations notables tant du point de vue qualitatif que quantitatif ; leur origine est essentiellement détritique.

La composition de ce cortège minéralogique se rapproche de celui rencontré en Méditerranée occidentale (Chamley 1971), en mer d'Alboran (Hassouni 1997) et sur la marge méditerranéenne marocaine (El Moumni & Monaco 1992, et El Moumni *et al.* 1999).

Baie de Cadix

L'analyse des sédiments superficiels du fond de la baie de Cadix montre l'existence de faciès à granulométrie et disposition variables (Achab *et al.* 1999c). Ces faciès occupent différents milieux de sédimentation, parfois en déséquilibre avec le système hydrodynamique actuel. En fonction des caractéristiques granulométriques des sédiments, de leur origine et de leur évolution, ainsi que de l'intensité des agents hydrodynamiques, deux principaux

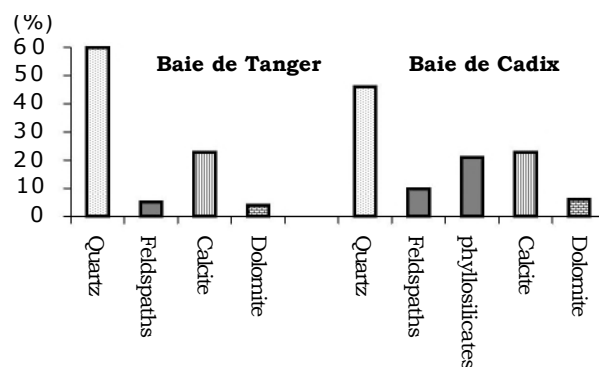


Figure 9. Cortège minéralogique du sédiment brut de la baie de Tanger et la baie de Cadix.

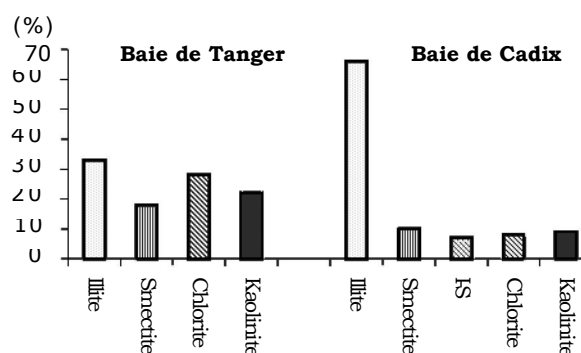


Figure 10. Cortège minéralogique de la fraction argileuse des sédiments de la baie de Tanger et la baie de Cadix.

secteurs ont été différenciés : la baie externe et la baie interne (Fig. 11).

La baie externe au nord est caractérisée par la prédominance des fonds sableux, surtout dans la zone littorale (1 à 10 m). Les différentes classes granulo-métriques sont généralement orientées en bandes qui suivent la forme de la côte et du fond marin, depuis les zones les plus internes jusqu'au domaine marin ouvert, près du proche plateau continental. Dans cette zone de la baie, on peut différencier : (i) un faciès sableux, occupant la plus grande partie de la couverture meuble de la baie externe ; il apparaît dans les zones littorales, et à proximité du proche plateau continental, jusqu'à des profondeurs de 40 m ; (ii) un faciès principalement constitué de sable vaseux et localement de vase ; il est particulièrement abondant dans les secteurs central et oriental de la baie externe. Les faciès fins apparaissent en deux bandes principales ; la première s'étend vers la marge nord de la baie en direction du NW, alors que la deuxième se prolonge vers l'ouest et le SW jusqu'au plateau interne atteignant parfois des profondeurs de 20 à 30 m.

La baie interne, située au sud, est protégée de l'action de la houle du SW, ce qui favorise la prédominance des faciès vaseux. Dans ce secteur plusieurs types de faciès ont été différenciés : (i) le faciès vaseux, le plus abondant, en particulier dans les zones profondes de la baie interne et près des deltas de marée qui se trouvent à l'embouchure des principaux chenaux ; (ii) le faciès de vases sableuses, qui

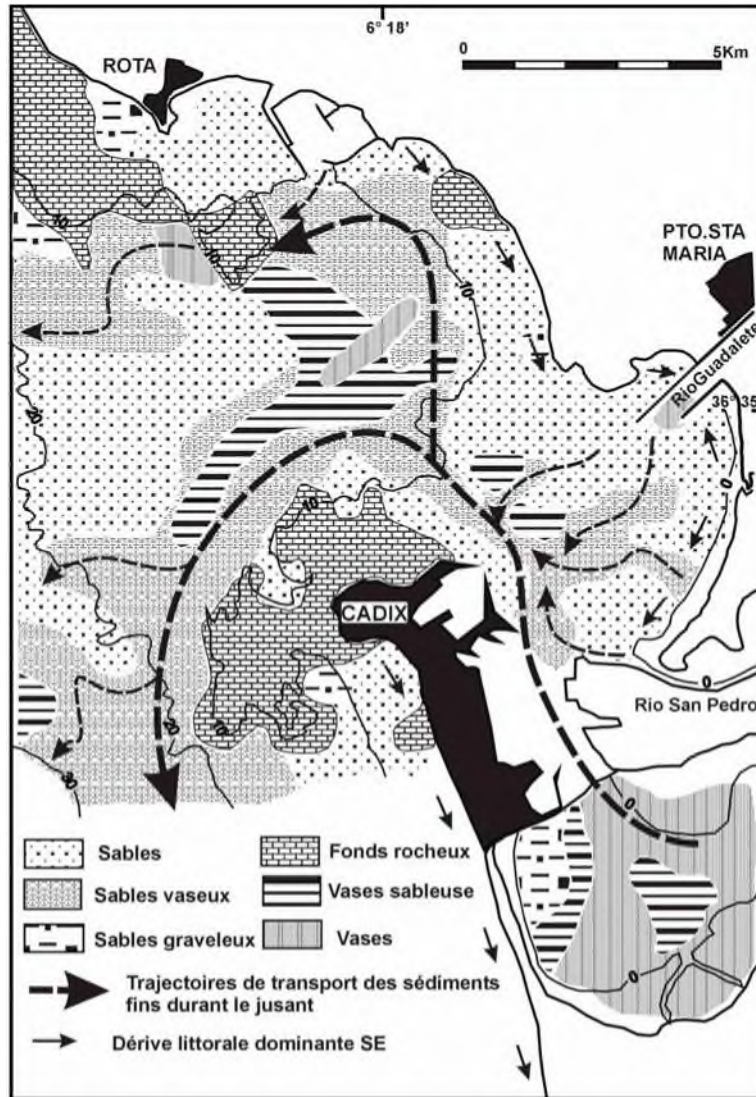


Figure 11. Carte des faciès sédimentaires et trajectoires de transport de sédiments dans la baie de Cadix.

apparaît dans des zones marginales et périphériques de la baie, près du cordon sableux qui limite cette partie de la baie avec la mer ouverte et aussi dans des points situés dans des zones plus profondes ; (iii) la zone de marécage située plus au sud se caractérise par des sédiments de nature argilo-sableuse dans les bords des marais et des chenaux, alors qu'au niveau des plages les sables prédominent (Achab *et al.* 1999b).

L'étude minéralogique du sédiment brut de la baie de Cadix montre que le quartz est le minéral le plus abondant, avec des proportions moyennes de 50% (Fig. 9), mais qui sont variables en fonction de la nature et de la distribution des faciès granulométriques. Ce minéral proviendrait des grès de la Formation Aljibe (Oligocène–Miocène inférieur), constituée par plus de 90% de quartz, et des calcarénites du Miocène supérieur, dont les teneurs en quartz dépassent généralement 40% (Achab & Gutiérrez Mas 2002). Ces matériaux peuvent atteindre la baie de Cadix à travers Rio Guadalete, et à partir du remaniement des sédiments récents. La calcite, le minéral le plus abondant après le quartz, présente des teneurs moyennes de 23% et une distribution homogène. Ce minéral est fondamentalement d'origine biogénique. Les feldspaths apparaissent en

quantité moyenne de 10%, bien qu'ils puissent atteindre localement des valeurs de 20%. La dolomite ne dépasse pas 6%, pouvant atteindre localement 20%.

La minéralogie de la fraction argileuse montre la prépondérance de cinq minéraux qui présentent une évolution relative à leur comportement dynamique (Achab *et al.* 1999b) (Fig. 10) : l'illite (65%), la smectite (9%), la kaolinite (8%), la chlorite (7%), et l'interstratifié illite-smectite (6%). Ce cortège argileux, qui traduit fidèlement l'héritage continental, provient des formations plio-quadernaires drainées principalement par le Guadalete, et de l'érosion des falaises côtières qui bordent le littoral de Cadix, affectées par l'action des courants de l'ouest et du SW (Vigier 1974, Zazo 1980, et Achab *et al.* 1999b).

Dynamique sédimentaire

Du point de vue dynamique sédimentaire récente, les baies de Tanger et de Cadix constituent des secteurs caractérisés par la variété des milieux sédimentaires, distincts les uns des autres par leurs caractéristiques hydrodynamiques et environnementales, ainsi que par la nature des processus et dépôts sédimentaires dans ces deux zones.

Baie de Tanger

Dans la baie de Tanger, la distribution des sédiments superficiels montre deux secteurs différenciés par leur caractéristiques sédimentologiques et le régime hydrodynamique dominant : le secteur oriental montre la prédominance d'un faciès sableux, à gradient décroissant vers l'ouest, parfois présent jusqu'à des profondeurs de 15 m. La mise en place de ce stock sableux est liée principalement à la houle du nord-est, à l'oued Chatt qui draine des sables, des graviers et des galets, et à la présence des fonds rocheux (El Arrim 2001). Ce secteur subit l'influence des houles dominantes du NE. La quantité de sédiments transportés vers l'ouest par les courants du NE ($v = 0,4$ m/s) est estimée à $1000 \text{ m}^3/\text{j}$ environ (Long 1998), traduisant un régime énergétique moyen à élevé. Le secteur occidental se caractérise par des sédiments fins de nature vaseuse, localisés en face de l'embouchure des oueds Souani et Mghogha, allant jusqu'à 10 m de profondeur. Les houles du secteur NW engendrent un courant ($v < 0,3$ m/s) qui transporterait vers l'est environ $800 \text{ m}^3/\text{j}$ (Long 1998). Dans la zone de protection du port, à l'extrémité ouest de la baie, apparaissent des mélanges de sable vaseux et de vases sableuses, traduisant une zone à régime hydrodynamique faible.

Les plages de la baie de Tanger sont constituées de sables fins dans le secteur ouest, et de sables moyens dans le secteur est. Ceci concorde parfaitement avec les données dynamique ; en effet, l'énergie de la houle est plus importante au niveau des plages de la côte est, ce qui permet un meilleur classement des sables. En outre, ces données indiquent que la taille des grains des sables diminue en allant de l'est (Cap Malabata) vers (le port) l'ouest de la baie ce qui implique un transport littoral dans ce sens (El Moumni *et al.* 2002, El Arrim *et al.* 2003).

Dans l'ensemble de la baie de Tanger, la distribution des sédiments tant sur le littoral que sur le fonds marin, est généralement contrôlée par des facteurs hydrodynamiques, ainsi que par les principales sources d'apport (oueds). Les sédiments sableux apparaissent dans la zone orientale, où prédomine la houle du NNE et NE, traduisant un milieu agité. Dans la zone occidentale, généralement plus protégée de l'action des houles du NW, les sédiments fins sont de plus en plus importants, avec d'autres mélanges de faciès de type sable vaseux et vase sableuse. La répartition des minéraux révèle une origine continentale détritique issue des formations de l'arrière-pays. Les sédiments superficiels présents dans la baie de Tanger pourraient avoir deux origines possibles (El Arrim *et al.* 2002) : l'érosion des falaises argilo-gréseuses surplombant le littoral de la baie de Tanger, qui débitent l'essentiel de la fraction grossière; et les apports solides des principaux cours d'eau débouchant dans la baie de Tanger, en particulier les oueds Souani, Mlaleh et Mghogha.

Baie de Cadix

La présence dans la partie centrale de la baie externe de sables vaseux et de vases qui coiffent des sédiments sableux, relève des processus actuels de transport et de mise en place des sédiments fins en suspension, provenant principalement de la remobilisation et du remaniement des

fonds vaseux de la baie interne, en particulier en périodes de vents forts qui soufflent de l'est et du SE. Les particules en suspension sont transportées par la suite vers la partie externe de la baie par les courants de jusant, avec une vitesse moyenne de $1,02$ m/s, qui se réduit à $0,77$ m/s au sein de la baie externe. Ceci conduit à la décantation et la précipitation d'une grande partie de la charge transportée sur les fonds sableux (Gutiérrez Mas *et al.* 1999, et Achab *et al.* 1999b, 2002). Ce modèle de transport sédimentaire est confirmé aussi par les études sonographiques réalisées dans la baie de Cadix, à partir de l'analyse des *bed forms* mis en place sous l'effet des courants de marée. Ces données indiquent que la direction de transport des sédiments au niveau du fond s'effectue vers l'ouest et le SW (Parrado Roman *et al.* 1996 et 1999).

Le taux de sédimentation est conditionné par les principales sources d'apport qui débouchent directement dans la baie, comme le Guadalete et le San Pedro qui sont responsables de la présence des accumulations vaseuses en face de leur embouchure. Les sédiments fins proviennent aussi de la remobilisation et du remaniement des fonds vaseux de la baie interne et de l'érosion des zones de marécage, plaine alluviale et chenaux de marée. Plus au nord de la baie, le Guadalquivir fournit aussi une grande quantité de matériaux fins en suspension, dont une partie de la charge peut atteindre et pénétrer dans la baie par l'action des courants littoraux. Les sédiments proviennent des apports fluviaux, de l'érosion des falaises, de la plate-forme d'abrasion plio-quaternaire, ainsi que des dépôts anciens.

Ces sédiments peuvent être transportés à des zones stables et plus profondes par l'action des courants de retour ou sagittaux produits par les fortes tempêtes. D'autres faciès sableux présents dans la baie externe ne sont plus en équilibre avec la dynamique sédimentaire actuelle ; ces derniers peuvent être de caractère relique. Ils ont dû être formés dans des milieux de haute énergie, quand le niveau de la mer se trouvait au dessous du niveau actuel (Achab *et al.* 1999a).

La distribution des faciès sédimentaires reflète généralement l'action du système hydrodynamique qui contrôle l'énergie des milieux de dépôt dans la baie de Cadix. D'autres facteurs de contrôle de la dynamique sédimentaire sont en relation avec la morphologie de la côte et celle du fond marin ; en effet, l'orientation dominante de la côte, NNW-SSE, fait que cette dernière reçoit de face les houles du secteur SW. Ce contrôle morphostructural, conjointement avec les changements consécutifs du niveau de la mer pendant les dernières étapes de l'Holocène, a conditionné aussi les milieux de dépôt, la dynamique sédimentaire, la distribution des faciès, ainsi que la position de l'embouchure des principales sources d'apport.

CONCLUSIONS

1. L'analyse sédimentologique des dépôts superficiels de la baie de Tanger met en évidence la présence de deux secteurs. Le secteur oriental, à prédominance de faciès sableux décroissant vers l'ouest, subit l'influence des houles NE, traduisant un régime énergétique moyen à élevé. Le secteur occidental se caractérise par la

présence des sédiments fins de nature vaseuse en face de l'embouchure des oueds, tandis qu'à l'extrémité ouest de la baie, apparaissent des mélanges de faciès de type sables vaseux et vases sableuses, traduisant une zone à régime hydrodynamique faible. Le cortège minéralogique est constitué principalement par le quartz et la calcite pour le sédiment total, et la kaolinite et l'illite pour la fraction argileuse ; leur origine est essentiellement détritique et sont issues des formations de l'arrière-pays.

2. La dynamique sédimentaire récente de la baie de Tanger semble avoir une évolution contrôlée par les caractéristiques hydrodynamiques. Les courants engendrés par les houles du secteur NW et les vagues du NE sont responsables de la distribution des sédiments dans la baie et de la dégradation des plages dans la partie est, en favorisant l'engraissement du secteur ouest ; *il s'agit donc d'un exemple de milieu marin côtier dominé par la houle et les vagues*. La dérive littorale transporte les sédiments de l'est à l'ouest en favorisant un meilleur classement granulométrique. L'influence de l'énergie des houles diminue de l'est vers l'ouest de la baie, ce qui explique la présence des faciès fins dans le secteur occidental, en particulier dans la zone abritée par le brise-lames.

3. L'analyse des sédiments superficiels de fond de la baie de Cadix montre des faciès à granulométrie et disposition variables. Ces faciès occupent différents milieux de sédimentation, parfois en déséquilibre avec le système hydrodynamique actuel. Du point de vue granulométrique, la baie de Cadix se divise en deux secteurs. La baie externe, à prédominance de sédiments sableux dans le littoral et le domaine marin profond, tandis que les sédiments de nature sablo-vaseuse occupent les secteurs central et oriental. La baie interne est caractérisée par des fonds de nature vaseuse. Plus au sud, la zone des marécages et les chenaux

de marée montrent l'abondance des vases sableuses. L'analyse minéralogique montre la prédominance du quartz dans la fraction sableuse, de l'illite dans la fraction argileuse et de la calcite dans la fraction carbonatée d'origine bioclastique.

4. La dynamique sédimentaire récente de la baie de Cadix est contrôlée principalement par les courants de marée, en particulier les courants de jusant. *Il s'agit donc d'un exemple de milieu marin côtier dominé par les marées*. Ces dernières sont responsables de la distribution des faciès sédimentaires, du remaniement des fonds peu profonds de la baie interne et du transport des sédiments fins qui en résultent vers la partie externe de la baie. Ceci explique la présence des faciès vaseux dans le secteur central de la baie externe. Les courants produits par les houles de composante NW favorisent le transport des sédiments dans le sens de la dérive littorale. Les houles de SW sont responsables de l'érosion des plages, des cordons dunaires et les falaises plio-quadernaires qui bordent le littoral de Cadix. La morphologie de la côte et celle du fond marin, ainsi que la variation du niveau marin ont conditionné la dynamique sédimentaire et la distribution des faciès dans la baie de Cadix.

Remerciements

Les auteurs remercient MM. Mustapha Labraïmi et Abdellah Ammar (Faculté des Sciences, Rabat) et F.J. Gracia (Faculté des Sciences de la mer, Cadix) pour leurs commentaires et leurs critiques pertinentes qui ont contribué à l'amélioration du manuscrit. Ce travail a été en partie financé par le projet REN2002-01142/Mar (D.G.E.S, Espagne) et le projet PARS SDU 80 (Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique, Maroc).

Références

- Achab M. 2000. *Estudio de la transferencia sedimentaria entre la bahía de Cadiz y la plataforma continental adyacente : Modelo de transporte mediante el uso de minerales de arcilla como trazadores naturales*. Thèse Doct., Fac. Sci. de la Mer, Cadix (publiée par UMI Dissertation Services ProQuest information and learning Company, USA), 538 p.
- Achab M. & Gutiérrez Mas J.M. 1999. Características y factor de control del relleno sedimentario reciente en los fondos de la bahía de Cádiz, *Geogaceta*, 27, 3-6.
- Achab M. & Gutiérrez Mas J.M. 2002. Analysis of terrigenous components present in the sand fraction of Cadiz bay bottoms (SW Spain). *Thalassas*, Vigo, 18(1), 9-17.
- Achab M., Gutiérrez Mas J.M. & El Moumni B. 2002. Dynamique d'échange et de transport des sédiments dans la baie de Cadix (SW-Espagne). *IF^{ème} Journ. Nat. Sci. Mer*, Inst. Sci. Rabat, 7-8 juillet 2002, pp. 21-22.
- Achab M., Gutiérrez Mas J.M., Sánchez Bellón, A. & López Aguayo F. 1999a. Dinámica de incorporación y transporte de sedimentos finos y minerales de arcilla entre la zona interna y externa de la bahía de Cádiz, *Geogaceta*, 27, 11-14.
- Achab M., Gutiérrez Mas J.M., Moral Cardona J.P., Parrado Román J.M., González Caballero J.L. & López Aguayo F. 1999b. Diferenciación de faciès relictas y actuales en los sedimentos recientes de los fondos de la bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27, 7-10.
- Aloisi J.C., Monaco A. & Pauc H. 1975. Mécanismes de la formation des prodeltas dans le golfe du Lion. Exemple de l'embouchure de l'Aude (Languedoc). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, 18, 3-12.
- Benavente J. 1997. *Introducción al estudio de la dinámica morfosedimentaria de las playas del norte de la Bahía de Cádiz : Vistahermosa, Santa Catalina y la Puntilla*. Thèse de Licence, Univ. Cadix, 192 p.
- 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, Fac. Lettres, Nantes, 413 p.
- Chamley H. 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Sci. Géol.*, Strasbourg, Mém. 35, 225 p.
- Dabrio C.J., Zazo C., Goy J.L., Sierro F.J., Borja F., Lario J., Gonzalez A. & Flores, J.A. 2000. Depositional history of estuarine infill during the last postglacial transgression (Gulf of Cadiz, Southern Spain). *Mar. Geol.*, 162, 381-404.
- Didon J., Durand-Delga M., Esteras M., Feinberg H., Mange M. & Suter G. 1984. Les formations des grès numidiens de l'arc de Gibraltar s'intercalent stratigraphiquement entre les argiles d'oligocènes et des marnes burdigaliennes. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 3, 121-128.
- El Arrim A. 1996. *Etude d'impact de la dynamique sédimentaire et des aménagements sur la stabilité du littoral du Golfe de Tunis*. Thèse de Doctorat de Spécialité. Univ. Tunis II, 223 p.

- El Arrim. A. 2001. *Contribution à l'étude du littoral de la baie de Tanger (Rif Nord Occidental-Maroc). Approches sédimentologique, géochimique et impact de la dynamique sédimentaire*. Thèse de Doctorat, Univ. Abdelmalek Essaadi, Fac. Sci. Techn. Tanger, 150 p.
- El Arrim A., Maâtouk M., El Hatimi I., Afailal-Tribak A. & El Moumni B. 2002. Les sédiments superficiels de la baie de Tanger (Maroc) : nature et origine. *Afr. Geosci. Rev.*, 9, 245-253.
- El Arrim A., Maatouk M., El Moumni B., Afailal-Tribak A. & El Khachani H. 2003. Le littoral de la baie de Tanger (Rif Nord Occidental-Maroc) : sédimentologie, géochimie et impact de la dynamique sédimentaire. *Trav. Inst. Sci. Rabat, sér. Géol. & Géogr. Phys.*, 21, 215-223.
- El Bouzidi R., Labraimi M. & Zourarah B. 2004. Morphological evolution and spatio-temporal variability of the longshore drift system in the bay of Tangier (Morocco). *J. Afr. Earth Sci.*, 39, 527-534.
- El Gharbaoui A. 1981. La terre et l'Homme dans la péninsule tangitane. Etude de l'homme et le milieu naturel dans le Rif occidental. *Trav. Inst. Sci. Rabat, sér. Géol. & Géogr. phys.*, 15, 362 p.
- El Hatimi I., Achab M. & El Moumni B. 2002. Impact des émissaires et canalisation sur l'environnement de la baie de Tanger : approche pluridisciplinaire. *Bull. Inst. Sci.*, sect. Sci. Terre, 24, 49-58.
- El Moumni B. 1987. *La sédimentation au Quaternaire terminal dans la partie méridionale de la mer d'Alboran (Marge marocaine)*. Doctorat de 3^{ème} cycle, Univ. Perpignan, 212 p.
- El Moumni B. 1994. *Contribution à l'étude des environnements sédimentaires au Quaternaire terminal en mer d'Alboran – Cas de la marge méridionale (Marge marocaine)*. Thèse d'Etat, Univ. Moulay Ismail, Fac. Sci. Meknès, 259 p.
- El Moumni B. & Monaco A. 1992. Etude minéralogique et géochimique des dépôts du Quaternaire récent de la partie orientale de la marge méditerranéenne marocaine (Mer d'Alboran). *Géol. Méd.*, XIX, 2, 55-68.
- El Moumni B., El Arrim A., Maatouk M., El Hatimi I., Wahbi M. & Afailal-Tribak A. 2002. Erosion de la baie de Tanger. *CIESM Workshop*, Tanger, ser. 18, 43-47.
- El Moumni B., El Hmaïdi F., Hassouni F.Z., Gensous B. & Monaco A. 1999. Sédimentologie et géochimie des dépôts superficiels de la marge méditerranéenne marocaine (partie occidentale). *Afr. Geosci. Rev.*, 6, 2, 141-148.
- Folk R.L. 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Univ. Texas, 182 p.
- Gao S. & Collins M.B. 1994. Analysis of grain size trends, for defining sediment transport pathways in marine environments. *J. Coast. Res.*, 10, 1, 70-78.
- Gensous B. & Tesson M. 1979. Morphologie et sédiments de la baie d'Alhucema. *Mines, Géol. et Energie.*, Rabat, 46, 127-134.
- Gracia F.J., Rodríguez Vidal J., Benavente J., Cáceres L. & López Aguayo F. 1999. Tectónica cuaternaria en la bahía de Cádiz. *Avances en el estudio del Cuaternario español*, Girona, 67-74.
- Gutiérrez Mas J.M., Achab M. & Gracia F.J. 2003. Tectonic and physiographic controls on the Quaternary marine sedimentation in the Cadiz bay (SW Spain). *Geodin. Acta*. 17/2, 153-161.
- Gutiérrez Mas J.M., Hernández Molina J. & López Aguayo F. 1996. Holocene sedimentary dynamic evolution on the northern continental shelf of the Gulf of Cadiz (SW Spain). *Cont. Shelf Res.*, 16, 13, 1635-1653.
- Gutiérrez Mas J.M., Sánchez Bellón A., Achab M., Ruiz Segura J., González Caballero J.L., Parrado Román J.M. & López Aguayo F. 1999. Determination of influenced zones by suspended matter flows coming from bay of Cadiz on the continental shelf. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.*, 15, 1-4, 145-152.
- Hassouni F.Z. 1997. *Contribution à l'étude de la sédimentation profonde en mer d'Alboran : apport sédimentologique et micropaléontologique*. Thèse de 3^{ème} cycle, Fac. Sci. Rabat, 180 p.
- Hoyez B. 1989. *Le Numidien et les flyschs oligo-miocènes de la bordure sud de la Méditerranée occidentale*. Thèse d'Etat. Univ. Lille, 459 p.
- Humbert M. 1971. Carte géotechnique de Tanger, *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 222.
- Larsonneur C. 1989. La Baie de Mont Saint Michel. Un modèle de sédimentation en zone tempérée. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 46, 5-73.
- L.C.H.F. (Laboratoire Central Hydraulique de France) 1972. Baie de Tanger. Rapport de l'étude théorique sur document (inédit).
- L.C.H.F. (Laboratoire Central Hydraulique de France) 1974. Aménagement de la baie de Tanger, protection de la plage. Avant-projet sommaire, 2^o Mém., 75 p.
- Long B.F. 1998. Rapport de visite de la plage de Tanger. Rapport interne (Direction du Port et de Domaine Pub), 16 p.
- Maouch S. 1987. *Mécanismes hydrosédimentaires en baie d'Alger (Algérie) : approche sédimentologique, géochimique et traitement statistique*. Thèse Doctorat. 3^{ème} Cycle, Univ. Perpignan, 214 p.
- Monaco A. 1970. *Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du plateau continental du Roussillon (Golfe de Lion)*. Doctorat d'Etat, Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 295 p.
- MOPT (Ministerio de Obras Publicas y Transportes) 1992. Clima marítimo en el litoral español, 72 p.
- Nombela M.A. 1989. *Oceanografía y Sedimentología de la Ría de Vigo*. Thèse Doctorale, Univ. Madrid, 291 p.
- Nombela M.A., Vilas F., Rodriguez, M.D. & Ares J.C. 1987. Estudio sedimentológico del litoral gallego : III. resultados previos sobre los sedimentos de los fondos de la ría de Vigo. *Thalassas*, Vigo, 5(1), 7-17.
- Olabarria C., Urgorri V. & Troncoso J.S. 1996. Distribución de los sedimentos de la ensenada do Baño (Ría de Ferrol). *Nova Acta Científica Compostelana (Biología)*, 6, 91-105.
- Parrado Román J.M., Gutiérrez Mas J.M. & Achab M. 1996. Determinación de direcciones de corrientes mediante el análisis de formas de fondo en la Bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 20(2), 378-381.
- Parrado Román J.M., Gutiérrez Mas J.M., Achab M., Luna Del Barco A. & Jódar Tenor J.M. 1999. Clasificación del régimen de flujo en los fondos de la bahía de Cádiz a partir del análisis de campos de formas de fondo. *Geogaceta*, 27, 189-192.
- Pons J.C., Parra M. & Maillet N. 1991. Etude minéralogique et géochimique des sources terrestres et des sédiments superficiels. In : La sédimentation fine dans la baie de Fort-de-France, influence de la minéralogie et de la géochimie des vases actuelles et sub-actuelles sur la qualité du milieu. *Rapp. Cons. Rég. Martinique*, 109 p.
- SECEG/SNED 1990. Carte géologique du détroit de Gibraltar au 1/200 000.
- Viguier C. 1974. *Le Néogène de l'Andalousie nord-occidentale (Espagne). Histoire géologique du bassin du bas Guadalquivir*. Thèse d'université, Bordeaux, 449 p.
- Zazo C. 1980. *El problema del limite Plio-Pleistoceno en el litoral de Cadiz*. Thèse Doctorale (2T). Univ. Complutense, Madrid, 339 p.
- Zazo C., Goy J. L. & Dabrio C. 1983. Medios marinos y marino-salobres en la bahía de Cádiz durante el Pleistoceno. *Rev. Mediterránea*, Ser. Geol, 2, 29-52.

Manuscrit déposé auprès du Comité BSM-17 le 20 mai 2004
 Transmis au Comité éditorial le 29 novembre 2004
 Version modifiée acceptée le 11 mars 2005