

Etude morphologique par Sonar à balayage latéral des sédiments meubles de la plateforme interne atlantique au Sud de Tanger (Maroc)

Mohamed Ali GEAWHARI^{1,2}, Nadia MHAMMDI² & Abdellah AMMAR¹

1. Université Mohammed V-Agdal, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, Av. Ibn Batouta, B.P. 1014 R.P., Rabat, Maroc. e-mail : m.geawhari@gmail.com; ammar@fsr.ac.ma
2. Université Mohammed-V-, Institut Scientifique, Département Sciences de la Terre, Laboratoire de Géophysique Av. Ibn Batouta, B.P. 703 Agdal, 10106 Rabat, Maroc. e-mail : mhammdi@israbat.ac.ma

Résumé. Cette étude est basée sur la cartographie détaillée de la partie proximale de la plateforme atlantique marocaine au sud de Cap Spartel, menée à l'aide d'un sonar à balayage latéral (SBL) et complétée par des données sédimentologiques provenant de sources bibliographiques. Les images sonar SBL montrent une mosaïque complexe de substrats rocheux et de corps sédimentaires transversaux et longitudinaux aux courants dominants. L'analyse morphologique suggère que les courants de marée sont l'agent hydrodynamique principal qui contrôle le développement des petites structures.

Mots clés : sonar à balayage latéral, plateau continental marocain, le large de Cap Spartel, dunes.

Morphological study by side-scan sonar of the unconsolidated sediments of the Atlantic internal platform south of Tangier (Morocco).

Abstract. This study is based on a detailed mapping of a sector of the proximal part of the Atlantic continental shelf located to the south of Cap Spartel (Morocco), by using a side-scan sonar (SSS), complemented by sedimentological data from bibliographic sources. The SSS images show a complex mosaic of bedrocks and diverse submarine bedforms which are transverse and longitudinal to the dominant current flows. The morphological analysis suggests that tidal currents are the main active hydrodynamic agent controlling the development of the small-scale features.

Key words: side-scan sonar, continental shelf, Morocco, offshore Cape Spartel, sand waves.

INTRODUCTION

Les dunes sous-marines, fréquentes sur les plates-formes continentales, sont connues depuis les descriptions de Hider (1882), Lüders (1929) et Van Veen (1935). Du fait qu'elles posent des problèmes pour l'aménagement des fleuves ou des zones côtières, et que leur déplacement présente des risques pour la navigation et l'installation d'ouvrages en mer, ces formes sédimentaires aux dimensions parfois imposantes ont très tôt suscité la curiosité des scientifiques. L'intérêt économique croissant lié aux zones relativement peu profondes du plateau continental explique également le regain d'attention porté aux processus sédimentaires dont ces zones particulières sont le siège (par exemple Allen 1980, Dalrymple *et al.* 1990, Dyer & Huntley 1999, Berné *et al.* 1988, Trentesaux 1993, Mhammdi 1994, Le Bot *et al.* 2000, Li *et al.* 2011).

La plupart des fonds meubles sont organisés selon des motifs qui traduisent les conditions hydrodynamiques actuelles ou passées du milieu. Les connaissances sur ces corps sédimentaires ont beaucoup progressé grâce au développement des méthodes acoustiques telles que le sondage bathymétrique (Goff *et al.* 1999, Todd *et al.* 1999, Loncke *et al.* 2002, Hellequin *et al.* 2003, Nitsche *et al.* 2004), l'imagerie par sonar à balayage latéral (Belderson & Stride 1966, Belderson *et al.* 1972, 1982) et la sismique de haute et très haute résolution (Houbolt 1968, Berné *et al.*

1988, Mahieux *et al.* 1998, Proust *et al.* 2001, Gibert *et al.* 2002).

Au nord du Maroc, le plateau continental du golfe de Cadix montre la présence de deux grands domaines de dunes sous-marines : des grandes dunes ($H > 1$) situées à une profondeur de 15 à 30 m avec une asymétrie orientée soit vers l'Ouest et vers WNW, soit vers l'Est (selon les régions), et des petites dunes ($H < 1$) apparaissant généralement dans les zones plates ou sur les grandes dunes en superposition (Lobo *et al.* 2000).

Au Maroc, une campagne océanographique réalisée au large de Tanger au sud du Cap Spartel à bord du navire océanographique de la Marine Royale Marocaine Abou Al Barakat lors de la mission SESMA en 2001-2002, a permis l'enregistrement de données à l'aide d'un sonar à balayage latéral (SBL). Ces données, mises à notre disposition au format de sonogrammes analogiques, nous ont permis de visualiser des structures sédimentaires qui n'avaient jamais été observées ni décrites auparavant, parmi lesquelles figurent des dunes sous-marines. Dans ce travail, nous exposons les résultats préliminaires de l'étude de la morphologie du fond marin de cette région, en utilisant l'imagerie acoustique obtenue à l'aide du SBL. Outre l'analyse des sonogrammes, une cartographie des domaines rocheux, des domaines sableux et des domaines mixtes y a été réalisée.

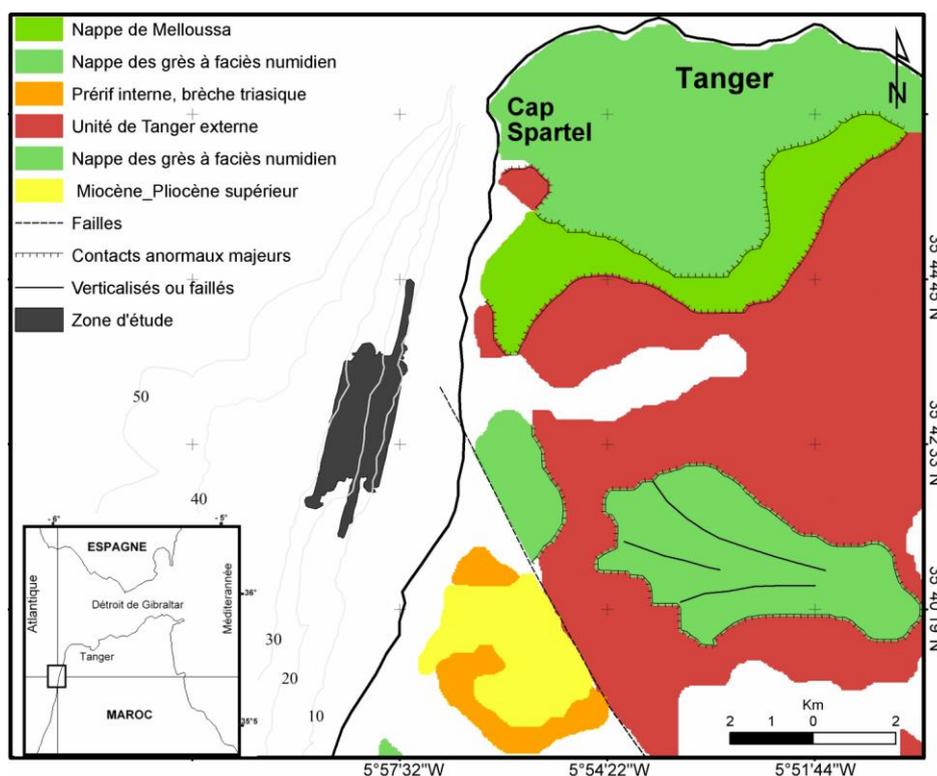


Figure 1. Cadre géologique et localisation de la zone d'étude au Sud de Cap Spartel.

DOMAINE D'ETUDE

Cadre géologique

La zone d'étude est située au large de la côte nord atlantique du Maroc entre 35°40'N et 35°46'N, et 5°57'W et 5°59'W en face de la partie sud du Cap Spartel (Fig. 1). Elle fait partie du système sous-marin du Rif, qualifié comme domaine largement influencé par le contexte géologique régional (Hafid *et al.* 2006). L'arrière-pays de la zone d'étude correspond à l'extrémité orientale de l'Unité de Tanger ; il est caractérisé par un relief de haute montagne appartenant à la partie nord du Rif externe, où les terrains essentiellement marneux sont d'âge allant du Crétacé supérieur au Miocène inférieur (Lespinasse 1975). Les terrains paléocènes, éocènes et du Miocène inférieur-moyen sont bien représentés dans le front occidental de cette unité par des formations détritiques (Suter & Feichter 1966).

Cadre océanographique

La plate-forme continentale atlantique marocaine est dominée à la fois par les courants océaniques, l'upwelling et les courants d'origine météorologique (Jaaidi 1993). Son évolution récente est le résultat, entre autres, des mouvements tectoniques (subsidence différentielle, jeux verticaux) et des variations eustatiques quaternaires. Par ailleurs, de par sa position géographique, elle se trouve sous l'influence d'un climat désertique dans sa partie sud et d'un climat méditerranéen dans sa partie nord. Ses grands traits

morphologiques et sédimentologiques ont été largement décrits par Jaaidi (1981, 1993), mais la dynamique sédimentaire et le modelé sous-marin de cette plate-forme n'ont été précisés que dans quelques zones limitées de sa partie saharienne (Newton *et al.* 1973).

La plate-forme continentale atlantique au large de Tanger est très étroite mais s'élargit vers le sud. Elle présente généralement une pente douce et régulière. Sa bordure externe est située à une profondeur d'environ 120 m.

Sédiments de surface

La couverture sédimentaire du plateau atlantique nord du Maroc a été étudiée par de nombreux auteurs (Erimesco 1965, McMaster & Lachance 1968, 1969, Summerhayes 1972, Summerhayes *et al.* 1972, 1976, Cirac *et al.* 1979, Duplantier *et al.* 1979, Duplantier & Gensous 1980, Jaaidi 1981, 1993, Baxerres 1982, El Foughali 1982, Mathieu 1986, Jaaidi & Cirac 1987, Duplantier & Cirac 1998). La couverture meuble de la plate-forme continentale ouest-rifaine, dont celle au large du Cap Spartel, comprend trois faciès (Jaaidi 1993) : sables terrigènes, sables bioclastiques et vases.

Faciès des sables terrigènes. Les sables terrigènes, constitués de sables moyens, fins à très fins par endroits, se répartissent sur la plate-forme interne où ils constituent le prisme littoral d'accrétion ; ces sables se répartissent en deux modes : des sables très fins (0,063 – 0,1 mm) et des sables fins (0,1 – 0,2 mm) ; le milieu de dépôt correspond à un niveau d'énergie élevée.

Faciès des sables bioclastiques. Les sables bioclastiques fins à moyens, occupant une bande relativement étroite sur la bordure externe de la plate-forme, sont caractérisés par un taux de carbonates supérieur à 50% et localement à 70% (Jaaidi 1993). Ces sables présentent une similitude avec ceux étudiés par Jaaidi (1993) dans la région de Larache côté continent. D'après ce même auteur, la présence de ces sables n'est pas en accord avec les conditions hydrodynamiques actuelles, car la présence d'ostracodes suggère une sédimentation mise en place sous des conditions d'énergie relativement élevées (niveau marin plus bas que l'actuel). Ce constat a été fait en Méditerranée (Aloisi 1986) où ces sables ont été qualifiés de « sables reliques du large » mis en place durant la dernière baisse du niveau marin quaternaire.

Faciès de vases. Pauvres en débris de macrofaune, les vases se caractérisent par des teneurs en lutite supérieures à 70% avec 10 à 20% de carbonates.

Conditions hydrodynamiques

Les agents hydrodynamiques les plus actifs sur le littoral et le plateau continental atlantique marocain, susceptibles d'éroder, de transporter et de former des corps sédimentaires, sont induits par les conditions météorologiques régnant sur l'Atlantique Nord dont fait partie le Nord du Maroc (Cirac 1987, Jaaidi 1993), les houles et les courants de retour sur le fond engendrés par les tempêtes et les courants de marée.

La marée est de type semi-diurne avec un régime mésotidal. Le marnage, de l'ordre de 2 à 3 m, induit des courants de marée de faible niveau énergétique. En général, le flot porte du Nord au NE et le jusant du Sud au SW (Cirac *et al.* 1989).

Les houles existent en permanence sur la côte atlantique marocaine, avec des périodes variant de 7 à 18 s. Les plus fortes houles, de fréquence décennale, peuvent atteindre 7 à 9 m d'amplitude et sont susceptibles de mobiliser les sédiments jusqu'à 100 m de profondeur (Cirac *et al.* 1989, Jaaidi 1993).

Sur la rive sud de l'entrée occidentale du détroit de Gibraltar, la houle a une hauteur significative de 7,8 m, avec une direction principale ouest à NW et une vitesse maximale ne dépassant pas 0,5 nœuds (El Gharbaoui 1981, SOGREAH 2003).

La dérive littorale se fait du Sud au Sud-Ouest, comme le montre bien la déviation de la flèche sédimentaire à l'embouchure de l'oued Tahaddart (Jaaidi 1993).

Les houles du secteur ouest peuvent également engendrer une dérive littorale secondaire orientée du Sud vers le Nord. La turbulence du déferlement, très intense, alimente la dérive littorale en matériaux sableux qui sont redistribués par les courants de marée (Jaaidi 1993).

METHODOLOGIE

Les données SBL ont été recueillies entre le 29 décembre 2001 et le 28 janvier 2002 par le navire océanographique de la Marine Royale Marocaine « Abou Al Barakat » lors de la mission "SESMA" et mises à notre disposition au format de sonogrammes analogiques.

Le SBL était de marque EG&G-272 de 100 kHz de fréquence, à courte durée d'impulsion (0,1 ms), et de portée 50 m ; il se compose d'un poisson remorqué, d'un câble électro-porteur et d'un enregistreur graphique selon un plan de positionnement.

Les différents faciès et la topographie ont été identifiés sur les sonogrammes sur la base de la réflectivité et de l'indice de rétro-diffusion du fond ; ainsi, les roches, les galets et les graviers, qui ont un pouvoir de réflexion plus important que les sables et les vases, sont plus foncés sur les enregistrements. Les pentes exposées aux rayons acoustiques apparaissent sombres alors que celles à l'ombre de ces rayons sont claires.

RESULTATS

Nature et distribution des sédiments

Les faciès

Les différentes signatures acoustiques sur les profils sonar ont permis d'identifier trois domaines d'importance inégale que nous appellerons le domaine rocheux, le domaine mixte et la couverture meuble (Fig. 2).

1. Le domaine rocheux

Les données du sonar latéral ont permis de visualiser un domaine rocheux qui occupe 15 % de la surface totale de la zone balayée. Il apparaît sur les images sonar sous une teinte sombre et un faciès très rétro-diffusant. Les terrains, appartenant à la nappe numidienne (domaine des nappes des Flyschs), constituent le substratum du plateau continental au sud du Cap Spartel. A l'affleurement, ils montrent trois aspects (Pl. I) :

- de gros corps rocheux de différentes tailles et de forme variable ; le passage au faciès sableux est souvent marqué par un escarpement (Pl. I, Fig. 3) ;
- un ensemble rocheux rectiligne avec des directions bien définies (NE-SW et SE-NW), soulignées par des crêtes (Pl. I, Figs 4 et 5) correspondant aux flancs de plis du substratum ;
- des platiers à faible escarpement, de superficie variable.

2. Le domaine mixte

Selon la définition de Boillot (1964), un domaine mixte ou caillouteux est un fond où les cailloutis affleurent sans être masqués par d'autres sédiments. Nos levés cartographiques montrent une large surface de domaine mixte, avec des cailloutis et des blocs rocheux représentant

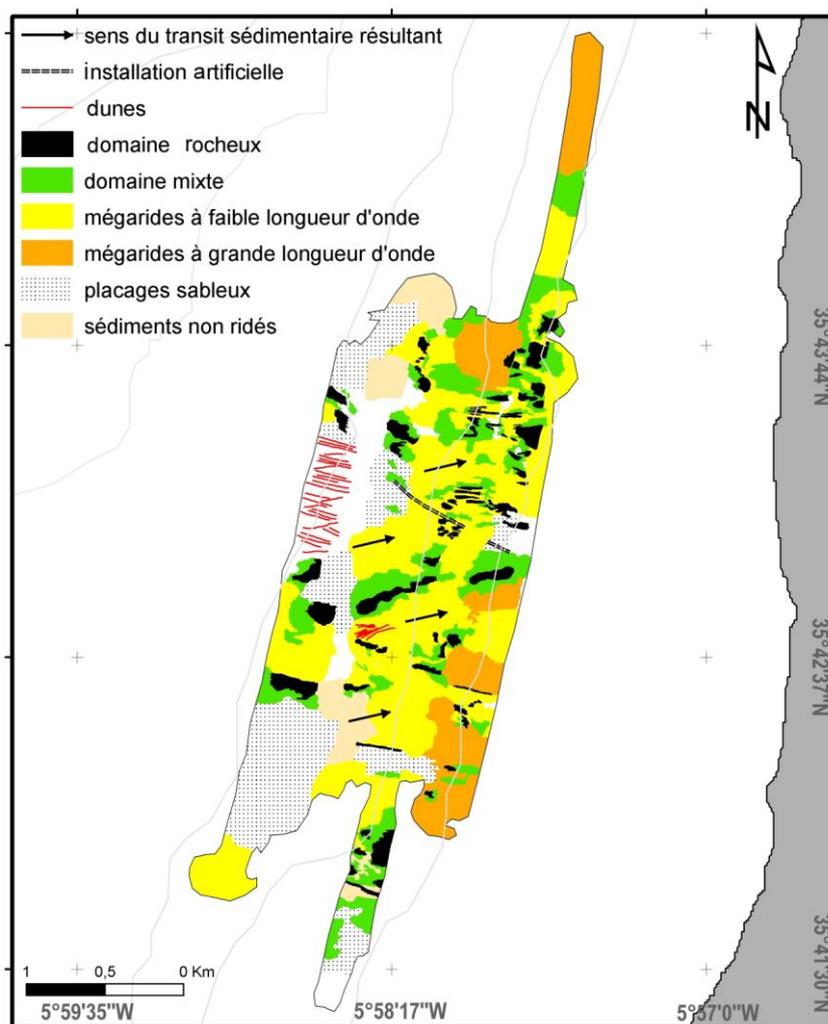


Figure 2. Distribution des formations superficielles au sud de Cap Spartel déduite du sonar à balayage latéral réalisé lors de la mission SESMA 2002.

30 % de la superficie totale de la zone balayée. Ils se localisent généralement à la périphérie des corps rocheux. Le pourcentage des cailloutis diminue en se dirigeant vers le large (Pl. I, Fig. 6).

3. Couverture sédimentaire meuble

Les sédiments fins sont peu rétrodiffusants et apparaissent sous forme de plages claires sur les sonogrammes, contrairement aux sédiments grossiers très rétrodiffusants qui apparaissent sous forme de plages foncées (Flemming & Stride 1967). Les quatre grands types de sédiments détectés sont :

- des sédiments vaseux, peu abondants dans le secteur balayé ;

- des sables fins à moyens, très répandus dans la zone étudiée ;
- des sables grossiers, qui augmentent en se rapprochant de la côte ;
- des cailloutis, qui se localisent généralement sur la périphérie des corps rocheux.

Cette couverture meuble a la particularité d’être modelée par des formes sédimentaires résultant de l’interaction entre le sédiment et l’hydrodynamisme.

Formes sédimentaires

L’analyse de la typologie et de la géométrie des formes ou des figures sédimentaires (*bedforms*) est importante car elle permet de caractériser qualitativement les transits sableux résiduels à l’échelle de la région (Fig. 2). On

Planche I. Figure 3 : sonogramme montrant des différents types de fonds. A, gros blocs rocheux ; B, cailloutis ; C, couverture sableuse à mégarides. Figure 4 : image sonar d’un ensemble rocheux avec une allure antiforme. Figure 5 : sonogramme montrant des affleurements rocheux, avec des crêtes soulignant des dépressions. Figure 6 : sonogramme montrant un domaine mixte.

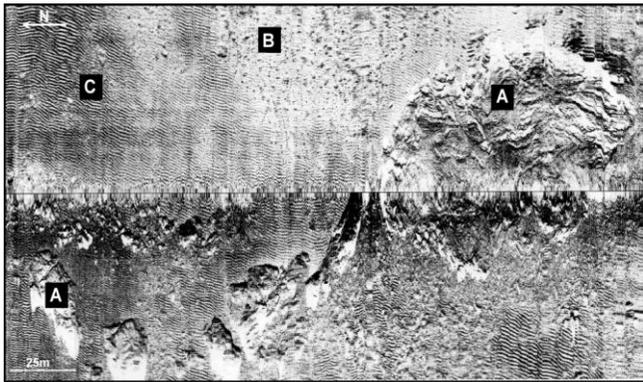


Figure 3

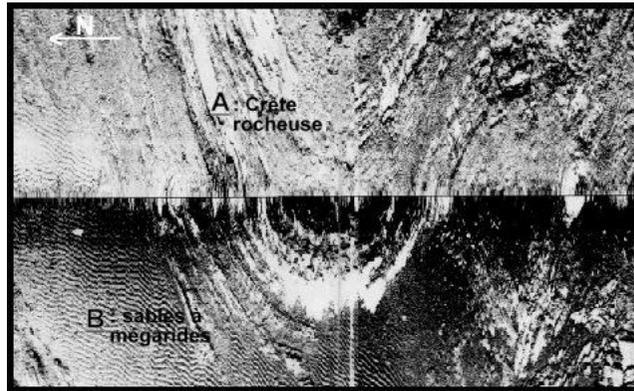


Figure 4

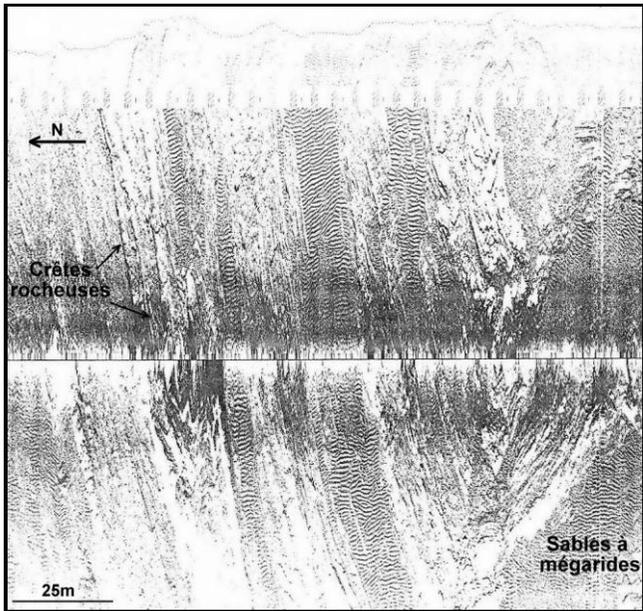


Figure 5

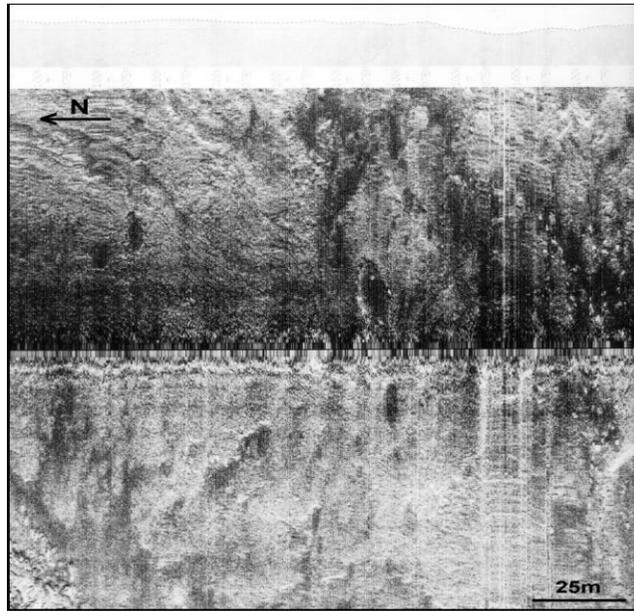
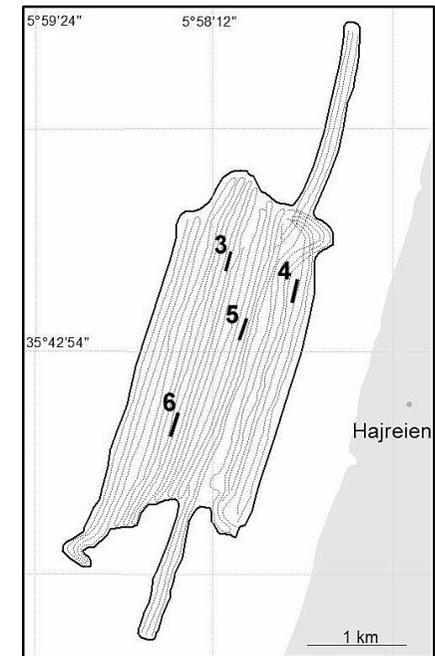


Figure 6



distingue sur le plateau marocain au sud de Cap Spartel deux types de structures sédimentaires : les structures parallèles aux courants, et celles qui leur sont perpendiculaires.

Les structures parallèles au courant

Les structures parallèles au courant sont présentes sur toute la zone (Pl. II) ; il s'agit :

- de rubans sableux, dont la longueur dépasse parfois 100 m ; plus au large, les rubans deviennent de petite taille avec une épaisseur inférieure à 1 m ; leur grand axe est parfaitement aligné sur la direction du grand axe de l'ellipse de marée (N) (Pl. II, Fig. 7) ;
- de placages sableux caractérisant des environnements de vitesse 50 cm/s et de stock sableux peu important ; au large de la partie sud de Cap Spartel, le sédiment est un sable fin à moyen reposant sur des sédiments plus grossiers souvent modelés par des mégarides ; ils se caractérisent par des formes allongées montrant des limites nettes avec le substratum. (Pl. II, Fig. 8) ;
- des "queues de comètes" au sens de Werner *et al.* (1980), qui permettent d'ailleurs en de nombreux points de déterminer le sens du transport ; il s'agit de figures érosives, formées à l'aval d'un obstacle et qui apparaissent sur l'image sonar sous la forme d'un faciès acoustique sombre dans le sillage des rochers ;
- des tâches sableuses de forme variable, souvent modelées en mégarides.

Les corps transverses au courant

Les corps transverses au courant sont de trois types : les rides, les petites dunes (mégarides) et les vagues de sables.

Les rides, invisibles au sonar, sont visibles seulement par caméra vidéo ; leur polarité s'inverse à chaque marée.

Les petites dunes (mégarides) conservent leur polarité vers l'Est (vers la côte), même en jusant de vives-eaux. Elles sont disposées :

- soit en champs de petites dunes, en particulier au niveau des dépressions entre deux ensembles rocheux (Fig. 2) ; elles se caractérisent par une forme légèrement sinueuse et une longueur d'onde de 1 m à 3,7 m ;
- soit sur les flancs doux des dunes (en superposition) ou au niveau des rubans sableux ; elles se caractérisent dans ce cas par des crêtes peu sinueuses d'une longueur d'onde comprise entre 0,5 et 1,83 m ; parfois, des petites dunes

migrant sur le flanc doux de la dune et alimentant la grande dune ont une longueur d'onde qui peut aller jusqu'à 4 m.

Les *mégarides* situées près de la côte montrent une variation latérale de la longueur d'onde de l'ordre de 2 m (Fig. 2 ; Pl. II, Fig. 9).

Les *vagues de sables* apparaissent comme des dunes disposées sous la forme de champs (Fig. 2). En fonction de leur orientation, nous avons pu distinguer deux types :

- des *dunes asymétriques* orientées vers le nord, avec une longueur d'onde comprise entre 23 et 65 m ; sur le flanc doux, elles se trouvent surmontées par de petites dunes anastomosées, à longueur d'onde moyenne de 3,5 m, orientées dans le même sens que les grandes dunes (Pl. II, Fig. 10) ;
- *champs des dunes asymétriques* avec une direction NE-SW ; la longueur d'onde atteint parfois 130 m, la longueur d'onde moyenne est de 90 m. (Pl. II, Fig. 11).

Distribution spatiale

Les particularités morpho-sédimentaires déduites des observations sonar (Fig. 2), ainsi que la comparaison des paramètres et indices morphologiques, ont permis de montrer une légère évolution dans l'espace (d'Ouest en Est) au niveau : (i) du stock sableux qui est considéré, généralement, plus élevé à l'Est qu'à l'Ouest de la zone balayé ; (ii) de l'énergie dynamique, qui est relativement plus forte à l'Est qu'à l'Ouest comme le suggère la plus grande extension des trainées sableuses dans l'unité orientale ; (iii) la granularité qui, augmente généralement vers la côte ; (iv) de la morphologie des corps sableux, comme le montre la localisation des mégarides de longueur d'onde relativement importante à l'Est.

Eléments artificiels sur les fonds

Le sonar utilisé au large de la partie sud de Cap Spartel, a permis de détecter des formes particulières, comparables à des objets artificiels non identifiés (Pl. III, Figs 12-13). Ainsi, certains sonogrammes montrent deux structures transverses d'une forme rectiligne, avec une longueur dépassant 400 m et une largeur de 4 m. Elles s'étendent vers le large en faisant un angle de 45° par rapport à la côte (Pl. III, Fig. 12). Des accumulations de sable sur ces formes laissent croire que ce sont des dunes avec un flanc doux orienté vers le Nord, tandis que les deux crêtes parallèles sont très droites, ce qui laisse supposer que ces formes sont attribuables à des installations artificielles, de type conduites, tapissées de sédiments.

Planche II. Figure 7 : image sonar des rubans sableux étroits au Sud de Cap Spartel. Figure 8 : sonogramme d'un placage sableux (en clair) reposant sur des sédiments relativement grossiers (en sombre). Figure 9. Sonogramme montrant un changement latéral de la longueur d'onde. Figure 10 : image sonar des dunes asymétriques surmontées par des petites dunes anastomosées. Figure 11 : sonogramme montrant des dunes orientées vers le nord, surmontées par des petites dunes symétriques sur le flanc doux.

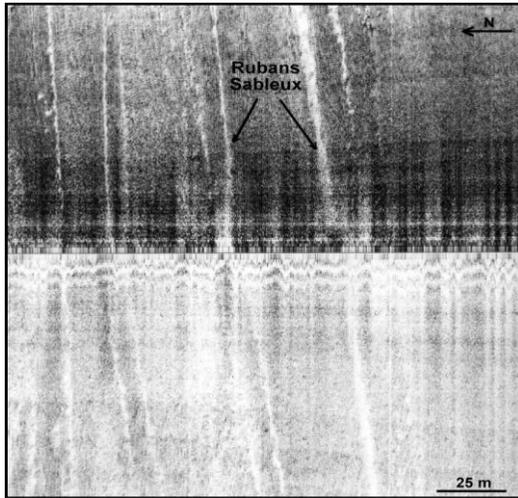


Figure 7

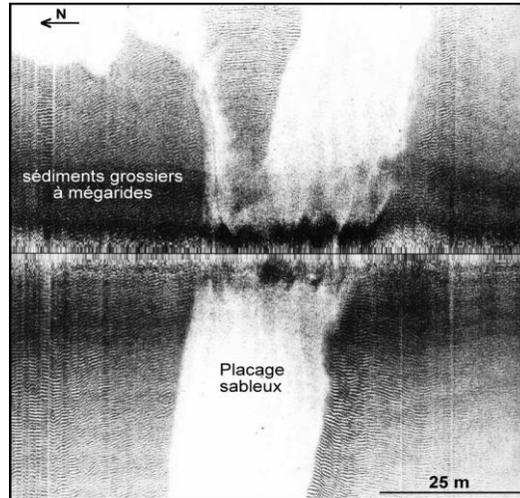


Figure 8

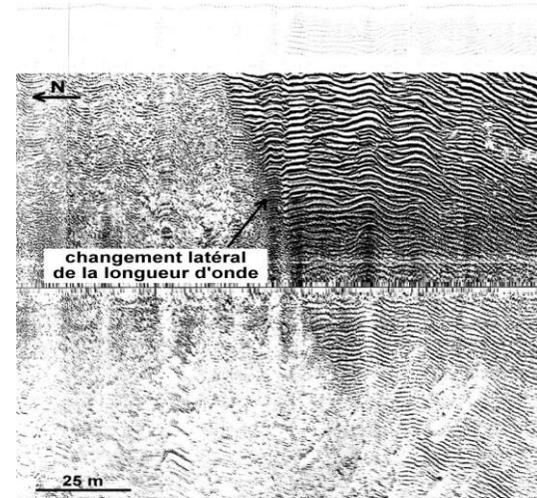


Figure 9

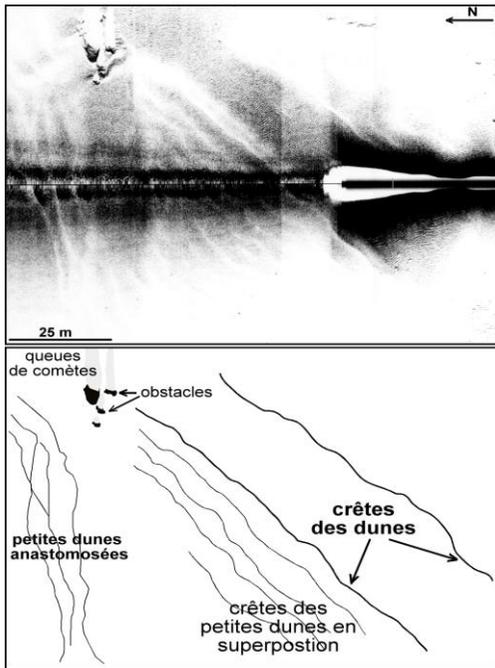


Figure 10

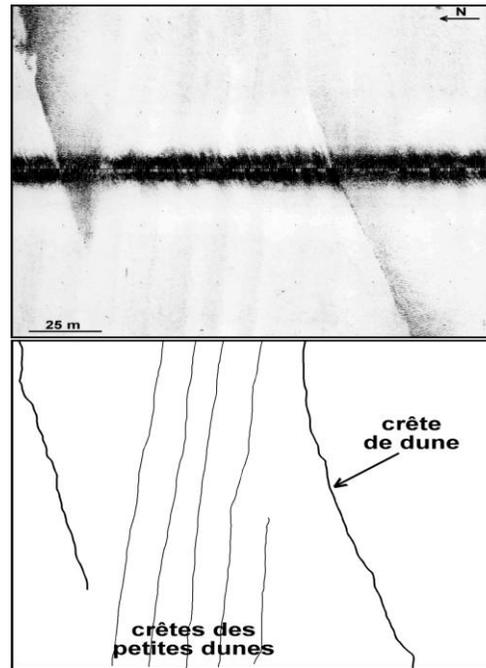
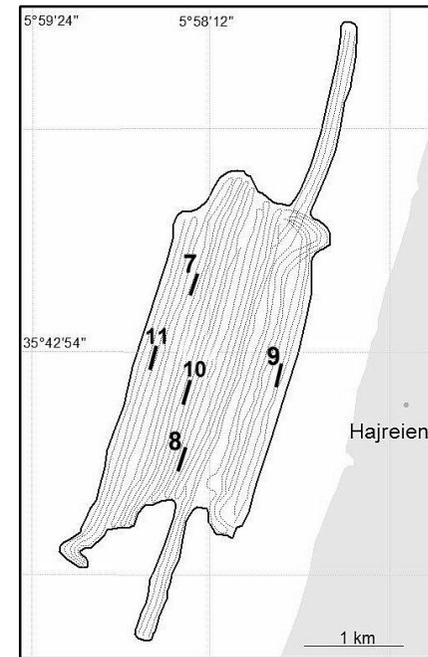


Figure 11



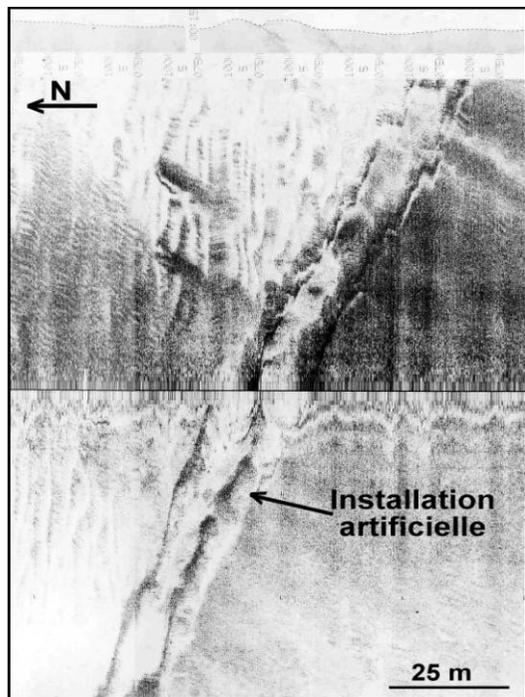


Figure 12

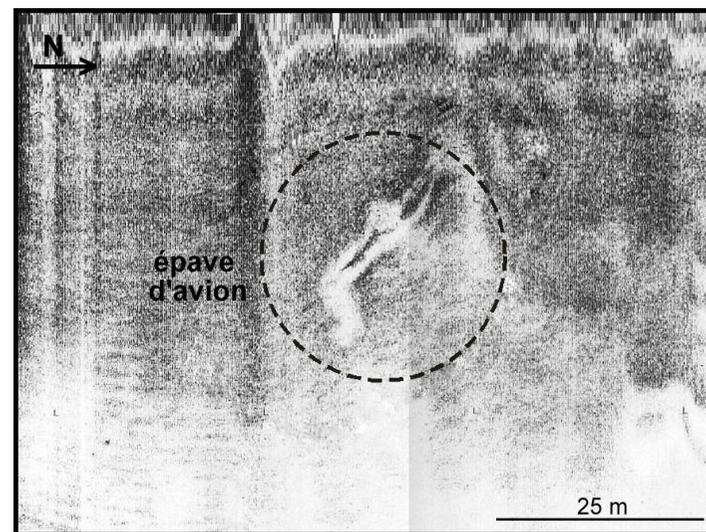
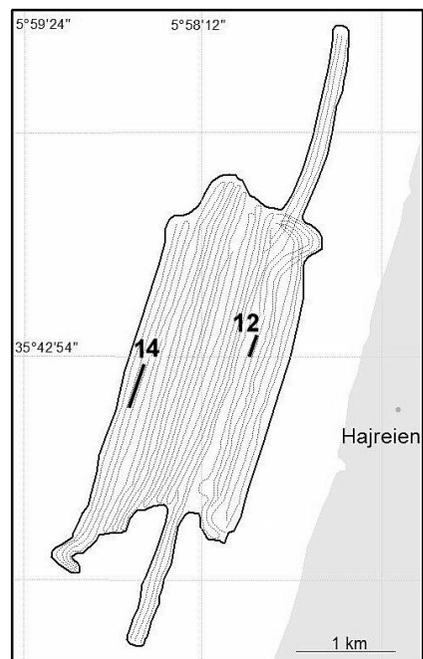


Figure 13

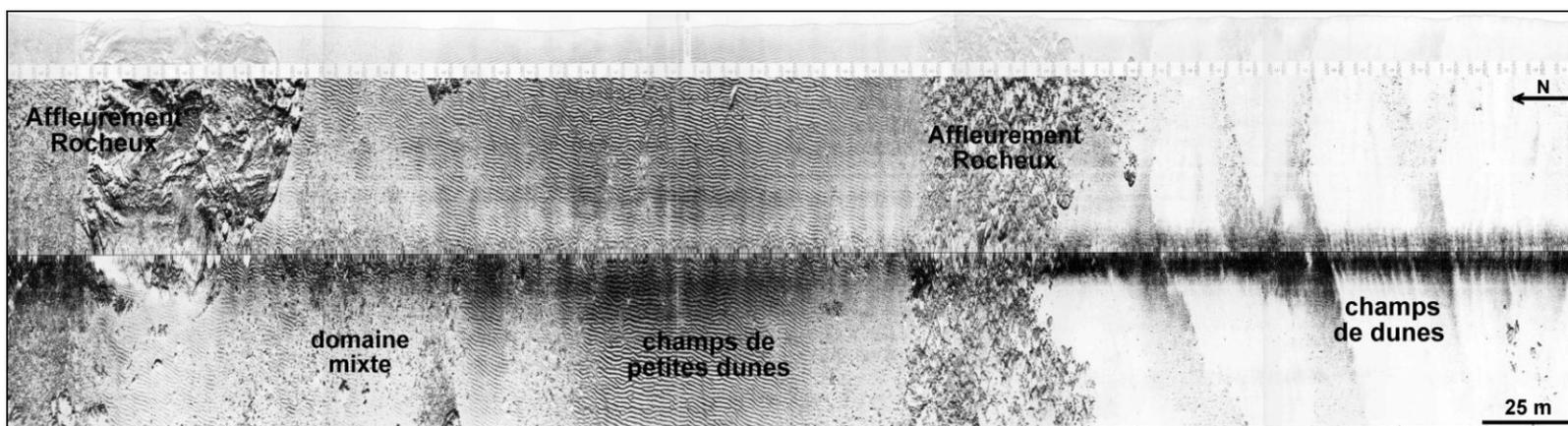


Figure 14

DISCUSSION

Estimation du stock sableux

Dans l'extrémité orientale de la zone étudiée, la couverture sédimentaire est discontinue et marquée par la présence des champs de mégarides et la dominance de placages sableux, qui traduisent des stocks sableux faibles.

Vers l'Est, la couverture est relativement continue, montrant quelques formes d'accumulation telles que les barkhanes dont la formation nécessite une quantité modeste de sable (Berné 1991). L'épaisseur des sédiments est relativement plus grande dans la partie occidentale de la zone balayée (Fig. 2).

De plus, selon Belderson *et al.* (1982), les changements de la longueur d'onde que l'on constate près de la côte seraient attribuables aux modifications de la taille des grains et de l'épaisseur de la couverture sableuse.

Dynamique sédimentaire

L'orientation et la morphologie de différentes structures, telles que les vagues de sables, les mégarides, et les marques d'obstacles, constituent les meilleurs indicateurs de la direction et du sens du transit sédimentaire d'une manière qualitative.

À partir de l'organisation des mégarides, nous déduisons que le transport sédimentaire résiduel s'effectue dans la direction ENE (Fig. 2).

Les vagues de sable et les mégarides peuvent avoir un profil asymétrique. Dans ce cas, le flanc de plus grande pente est orienté dans le sens du courant dominant. Il s'agit généralement du N ou du NE, sens de propagation du courant de flot. Le sable transiterait sur la pente douce avant de retomber en avalanche sur la pente raide. La "ride" elle-même pourrait être susceptible de se déplacer en masse dans le sens de son asymétrie. Il arrive parfois que la polarité de ces structures soit inversée ; il faut alors imaginer pour ces cas très localisés une dominance du courant de jusant. Les marques d'obstacles repérées dans la zone d'étude confirment le sens du courant déduit de la polarité de vagues de sables.

Parfois, les mégarides se trouvent influencées par la morphologie du fond, ce qui se traduit par des modifications locales de leur orientation. Elles se localisent à la périphérie des dunes repérées et les affleurements rocheux, dont on distingue deux familles (de mégarides), l'une correspondant au courant dominant, l'autre d'orientation différente.

Les dunes et les petites dunes (les vagues de sable et les mégarides) sont associées à des vitesses minimales de courant de 50 cm/s. Les vitesses de courant mesurées par Jaaidi (1993) pendant la campagne GEOMAR 1984 sont généralement supérieures ou égales à cette valeur limite ; d'autre part, la circulation près de la surface dans l'Est de l'Atlantique Nord, entre la Péninsule ibérique, les Açores et les Iles Canaries, étudiée à l'aide de bouées dérivantes (Martins *et al.* 2002), montre que les trajectoires des bouées dérivantes suivent un courant vers l'Est dans la zone nord du Maroc, y compris notre zone d'étude, avec une vitesse maximale de courant de l'ordre de 40 cm/s. Ceci suggère que les structures Nord-Est ne sont pas en équilibre avec les conditions hydrodynamiques de 2001-2002 et que seules les houles et les tempêtes sont responsables de la formation de structures sédimentaires dans le secteur d'étude.

Prolongement et rôle des structures rocheuses au large de la partie sud de Cap Spartel

Plusieurs auteurs qui ont abordé le contexte structural au niveau de la plateforme continentale ouest-rifaine (El Foughali 1985, Griboulard 1985, Jaaidi 1993), ont démontré que les principaux éléments structuraux dans la zone d'étude sont des prolongements de structures connues sur le continent, comme par exemple les nombreux plis de direction N45°.

Au sud de Cap Spartel, parmi les affleurements rocheux observés, on note la présence des formes rocheuses avec une allure antiforme–synforme, ainsi que des barres rocheuses avec une direction NE-SW. Ces orientations sont conformes aux directions structurales connues à terre. Ceci laisse supposer que la correspondance est évidente entre les formes et les directions marquées sur terre et celles observées au large.

En outre, sur le plan sédimentologique, les formations rocheuses révélées dans la zone d'étude, constituent un obstacle face aux sédiments, ce qui peut mener à un emmagasinement des sables et par conséquent à la formation de corps sableux de grandes dimensions. D'autre part, il est possible qu'elles protègent les formes sableuses contre le courant du flot, ce qui réduit le transport des sédiments vers le large (Pl. III, Fig. 14).

CONCLUSION

L'interprétation des profils sonar réalisés sur la plateforme interne au sud de Tanger a permis de recueillir un ensemble d'informations sur les reliefs du fond de la mer et sur les différents faciès sédimentaires.

Planche III. Figure 12 : sonogramme montrant l'installation artificielle sur un fond sableux à mégarides. Noter l'accumulation des sédiments qui sont visibles sous forme des deux dunes sur le profil du sonogramme. Figure 13 : sonogramme montrant des échos particuliers attribuables à une épave d'avion. Figure 14 : sonogramme montrant les différents types de fond : un affleurement rocheux, de forme arrondie, entouré par un domaine mixte (à gauche) ; des champs de dunes et de mégarides séparés par une série rocheuse de direction Est-Ouest.

La reconnaissance des images fait apparaître des mégarides, formées par la houle, et des vagues de sables, souvent superposées à des mégarides de faible longueur d'onde. Ces différents corps sableux sont constitués de sable fin à moyen (avec une taille de grain minimale d'ordre 0,17 mm) reposant sur un substrat rocheux.

Elle a permis aussi la visualisation des figures longitudinales telles que les placages sableux, qui reflètent essentiellement un milieu à faible quantité de sable, et des traînées sableuses à l'approche de la côte, qui caractérise des milieux à forte énergie.

Les observations réalisées sur la zone à l'aide du sonar à balayage latéral, prouvent que les différents corps transverses sont des formes mobiles, en équilibre avec les conditions hydro-sédimentaires actuelles ou récentes du milieu.

Chaque type de corps peut être rattaché à des phénomènes cycliques d'amplitude et de périodes différentes, mais aussi à l'action sporadique des tempêtes :

- les rides sont la traduction d'une cyclicité tidale semi-diurne ; leur polarité est inversée à chaque renverse, même en mortes-eaux ;
- la morphologie des petites dunes est contrôlée par la cyclicité mortes-eaux – vives-eaux ; les crêtes des dunes s'inversent pendant le jusant, mais les corps eux-mêmes sont préservés et montrent une progradation résultante quatre à cinq fois plus importante que celle des dunes ;

possédant leur propre dynamique de déplacement, elles participent à la progradation des grandes dunes en alimentant épisodiquement le sommet de celles-ci.

La polarité des dunes et l'orientation des rubans sableux, telles qu'on peut les déterminer à partir des images sonar, sont donc de bons indicateurs des sens de transports résiduels.

Sur le plan dynamique, l'orientation et la morphologie de différentes structures, telles que les vagues de sables et les marques d'obstacles, montrent que le transit sédimentaire est vers l'ENE.

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu être mené sans les données gracieusement offertes par le Service hydrographique de la Marine Royale Marocaine dans le cadre de la collaboration Institut Scientifique-Marine Royale. Il a été initialement financé par GOCE-CT-2005-51123 HERMES (Hotspot Ecosystem Research on the Margins of European Seas). Il a aussi bénéficié des financements conjoints de l'Action Intégrée AI/192/08, et des projets SVT N° 14/09 (Plan d'Urgence 2009-2012) et projet INQUA 2012 *Rapid environmental changes and human impact on continental shelves*. Nos vifs remerciements s'adressent à Claude Augris (Ifremer, Brest, France) et Alain Trentesaux (Université de Lille 1) pour leurs conseils lors de la rédaction de ce papier. Nous remercions également M. Bouchta El Moumni (Université Abdelmalek Essaadi, Faculté Pluridisciplinaire de Larache) et un évaluateur anonyme pour leurs remarques qui ont permis d'améliorer le manuscrit.

Références

- Allen J.R.L. 1980. Sand waves: a model for origin and internal structure. *Sed. Geol.*, 26, 281-328.
- Aloisi J.C. 1986. *Sur un modèle de sédimentation deltaïque. Contribution à la connaissance des marges passives*. Thèse d'Etat, Univ. Perpignan, 195 p.
- Baxerres P. 1982. Les variations des teneurs en carbonates des sables du littoral atlantique marocain entre Tanger et Casablanca. 9^{ème} R.A.S.T. Paris, p. 35.
- Belderson R.H. & Stride A.H. 1966. Bedforms, tidal current fashioning of a basal bed, *Mar. Geol.*, 4, 4, 237-257.
- Belderson R.H., Johnson M.A. & Kenyon N.H. 1982. Bedforms, in: Stride A.H. (Ed.) *Offshore tidal sand, processes and deposits*. Chapman & Hall, London, pp. 27-57.
- Belderson R.H., Kenyon N.H., Stride A.H. & Stubbs A.H. 1972. *Sonographs of the sea floor*, Elsevier, 1972, 185 p.
- Berné S. 1991. *Architecture et dynamique des dunes tidales (exemple de la marge atlantique française)*. Thèse, Univ. Lille-1, 295 p.
- Berné S., Auffret J.P. & Walker P. 1988. Internal structure of subtidal sand waves revealed by high-resolution seismic reflection, *Sedimentology* 35, 5-20.
- Boillot G. 1964. Géologie de la Manche occidentale, fonds rocheux, dépôts quaternaires, sédiments actuels. *Ann. Inst. Océanogr.*, Paris, 42, 219 p.
- Cirac P. 1987. *Le bassin Sud-rifain occidental au Néogène supérieur. Evolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours d'une phase de comblement*. Thèse Doct. Etat, Univ. Bordeaux I n°873, publiée dans *Mém. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, BX*, 21, 287 p.
- Cirac P., Faugères J.C. & Gayet J. 1979. Résultats préliminaires d'une reconnaissance sédimentaire du plateau atlantique marocain. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine Bordeaux*, 25, 69-81.
- Cirac P., Resseguier A. & Weber O. 1989. Situation courantologique et hydrologique sur le plateau continental atlantique Nordmarocain (mission GEOMAR II). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*, 46, 81-95.
- Dalrymple R.W., Knight R.J., Zaitlin B.A. & Middleton G.V. 1990. Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon Rive Estuary (Bay of Fundy). *Sedimentology*, 37, 577-612.
- Duplantier F. & Cirac P. 1983. La sédimentation sur le plateau continental atlantique marocain interférence des apports minéraux terrigènes et de la dynamique marine. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 296, sér. II, 467-472.
- Duplantier F. & Gensous B. 1980. Etude préliminaire du plateau continental interne de la région de Mohammedia (Maroc). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*, 28, 81-91.
- Duplantier F., Gensous B. & Tesson M. 1979. La couverture superficielle du plateau continental dans la région de Mohammedia (Meseta côtière marocaine). *Mines, Géol. Energie, Rabat*, 46, 135-142.
- Dyer K.R. & Huntley D.A. 1999. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges. *Cont. Shelf Res.*, 19, 1285-1330.
- El Foughali A. 1982. *Analyse morpho-structurale du plateau continental atlantique marocain de Tanger à Cap Cantin*. Maroc: Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Bordeaux I, 126 p.

- El Foughali A. 1985. Les grands traits structuraux et lithologiques de la marge marocaine de Tanger à Cap Cantin, Maroc. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 38, 179-211.
- 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.
- Erimesco P. 1965. La mer et l'atmosphère des côtes marocaines. *Bull. Inst. Pêches Maroc*, Casablanca, 13, 3-12.
- Flemming N.C. & Stride A. 1967. Basal sand and gravel patches with separate indications of tidal current and strom wave paths near Plymouth. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 47, 433-444.
- Gibert B., Le Gonidec Y. & Proust J.N. 2002. Multiscale analysis of waves reflected by complex interfaces: basic principles and experiments. *J. Geophys. Res.*, 107, B9, 2184.
- Goff J.A., Orange D.L., Mayer L.A. & Hughes Clarke J.E. 1999. Detailed investigation of continental shelf morphology using a high resolution swath sonar survey. The Eel margin, northern California. *Mar. Geol.*, 154, 255-269.
- Griboulard R. 1985. Les grands traits structuraux et lithologiques de la marge marocaine de Tanger à Cap Cantin, Maroc. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 38.
- Hafid M., Zizi M., Bally A.W. & Ait Salem A. 2006. Structural styles of the western onshore and offshore termination of the High Atlas, Morocco. *C. R. Geoscience*, 338, 50-64
- Hellequin L., Boucher J.M. & Lurton X. 2003. Processing of high frequency multibeam echo sounder data for seafloor characterization. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 28, 1, 78-89.
- Hider A. 1882. Observations at Lake Providence, Nov. 1879–Nov. 1880, Progr. Rep. Mississippi River Commission for 1882.
- Houbolt J.J.H.C. 1968. Recent sediments in the southern bight of the North Sea. *Geologie en Mijnbouw*, 47, 4, 245-273.
- Jaaidi E.B. 1981. *Les environnements sédimentaires actuels et pléistocènes du plateau continental atlantique marocain entre Larache et Agadir*. Thèse de 3^{ème} Cycle, Univ. Bordeaux I, 189 p.
- Jaaidi E.B. 1993. *La couverture sédimentaire post-glaciaire de la plate forme continentale Atlantique ouest-rifaine (Maroc nord-occidental) : exemple d'une séquence transgressive*. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 317 p.
- Jaaidi E.B. & Cirac P. 1987. La couverture sédimentaire meuble du plateau continental atlantique marocain entre Larache et Agadir. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 9, 42, 33-51.
- Le Bot S., Trentesaux A., Garlan T., Berne S. & Chamley H. 2000. Influence des tempêtes sur la mobilité des dunes tidales dans le détroit du Pas-de-Calais. *Oceanologica Acta*, 23, 2, 129-141.
- Lespinnasse P. 1975. *Géologie des zones externes et des flyschs entre chaouen et Zoumi (centre de la chaîne rifaine. Maroc)*. Thèse d'Etat, Sciences Naturelles, Univ. Paris, 231 p.
- Li Y., Lin M. & Jiang W. 2011. Process control of the sand wave migration in Beibu gulf of the South China Sea. *J. Hydrodyn.*, 23, 4, 439-466.
- Lobo F.J., Hernandez-Molina F.J., Somoza L., Rodero J., Maldonado A. & Barnolas A. 2000. Patterns of bottom current flow deduced from dune asymmetries over the Gulf of Cadiz shelf (southwest Spain). *Mar. Geol.*, 164, 91-117.
- Loncke L., Gaullier V., Bellaiche G. & Mascle J. 2002. Recent depositional patterns of the Nile deep-sea fan from echo-character mapping. *AAPG Bull.*, 86, 7, 1165-1186.
- Lüders K. 1929. Entstehung und Aufbau von Grossrücken mit Schillbedeckung in flut-bzw. *Senckenbergiana*, 11, 123-142.
- McMaster R.L. & Lachance T.P. 1968. Seismic reflectivity studies on the north western African continental shelf. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.*, 52, 12, 2387-2395.
- Mc Master R.L. & Lachance T.P. 1969. North-western African continental shelf sediments. *Mar. Geol.*, 7, 57-67.
- Martins C.S., Hamann M. & Fiuza A.F.G. 2002. Surface circulation in the eastern North Atlantic, from drifters and altimetry. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 3217, doi:10.1029/2000JC000345.
- Mahieux G., Proust J.N., Tessier B. & Debatist M. 1998. Comparison between high resolution seismic and sequence stratigraphic approaches applied to the Upper Jurassic deposits of the Dover Strait area (Northern France). *Mar. Petrol. Geol.*, 15, 329-342.
- Mathieu R. 1986. *Sédiments et Foraminifères actuels de la marge atlantique du Maroc*. Thèse d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI.
- Mhammdi N. 1994. *Architecture du banc sableux tidal de Serq (Iles Anglo-Normandes)*. Thèse Doctorat, Univ. Lille-1, 215 p.
- Newton R.S., Seibold E. & Werner F. 1973. Facies distribution patterns on the Spanish Sahara continental shelf, mapped with side scan sonar. "Meteor" *Forsh-Ergebnisse*, Berlin-Stuttgart, Reihe 15, 55-57.
- Nitsche F.O., Bell R., Carbotte S.M., Ryan W.B.F. & Flood R. 2004. Process-related classification of acoustic data from the Hudson River Estuary. *Mar. Geol.*, 209, 131-145.
- Proust J.N., Mahieux G. & Tessier B. 2001. Field and seismic images of sharp-based shorface deposits in the Kimmeridgian-Tithonian depositis of the Dover Strait. Implications on sequence stratigraphic interpretations. *J. Sedim Res.*, 71, 944-957.
- SOGREAH 2003. Étude de la faisabilité des émissaires en mer de la zone de Tanger. Rapport R3: Définition des critères de projet, calage du modèle hydrodynamique tridimensionnel. Société de l'eau et de l'électricité du Nord, Amendis, Tanger, Maroc, 87 p.
- Summerhayes C.P. 1972. Geochemistry of continental margin sediments from North-west Africa. *Chem. Geol.*, 10, 137-156.
- Summerhayes C.P., Milliman J.D., Briggs S.R., Bee A.G. & Hogan C. 1976. North-west African shelf sediments: influencee of climate and sedimentary processes. *J. Geol.* 84, 3, 277-300.
- Summerhayes C.P., Nutter A.H. & Tooms J.S. 1972. The distribution and origin of phosphate in sediments off North West Africa. *Sediment. Geol.* 8 : 3-28.
- Suter G. & Feichter G., 1966. Le Rif méridional Atlantique (Maro). Aperçu structural sur la région de Zoumni, Ouezzane et le Hay de Habt (Larache). *Note & Mém. Serv. géol. Maroc*, 26, 15-20.
- Todd B.J., Fader G.B.J., Courtney R.C. & Pickrill R.A. 1999. Quaternary geology and surficial sediment processes, Browns bank, Scotian shelf, based on multibeam bathymetry. *Mar. Geol.*, 162, 165-214.
- Trentesaux A. 1993. *Structure et dynamique sédimentaire du Middelkerke Bank, Mer du Nord méridionale*. Thèse Univ. Lille I, 229 p.
- Van Veen J. 1935. Sand waves in the Southern North Sea. *Int. Hydro. Rev.*, 12, 1, 21-29.
- Werner F., Unsold G., Koopman B. & Stephanon A. 1980. Field observations and flume experiments on the nature of cornet marks. *Sed. Geol.*, 26, 233-262.

Manuscrit reçu le 22 décembre 2011

Version modifiée acceptée le 14 décembre 2012