

Répartition spatiale des sédiments dans le bassin Ouest-Alboran et sa marge marocaine

Spatial distribution of sediments in the West-Alboran basin and its Moroccan margin

Oumnia BENMARHA^{1*}, Abdellah AMMAR¹ et Nadia MHAMMDI²

1. Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Département de Géologie, avenue Ibn-Batouta, B. P. 1014, Rabat-Agdal, Maroc.

*(oumniabenmarha@gmail.com ; oumnia_benmarha@um5.ac.ma)

2. Université Mohammed V, Institut Scientifique, avenue Ibn-Batouta, BP. 703, Rabat-Agdal, Maroc.

Résumé. La quantité et la qualité des données sismiques maintenant disponibles, sur la marge méditerranéenne marocaine et le bassin Ouest-Alboran, permettent d'établir une cartographie détaillée des épaisseurs sédimentaires et de mieux comprendre leur répartition et les principaux facteurs qui en sont responsables.

Les épaisseurs sédimentaires atteignent leur maximum au pied de la marge marocaine. Elles se répartissent selon un axe orienté NNW-SSE entre le banc de Xauen et le Détroit de Gibraltar recoupé par un deuxième axe (plus important) reliant Oued Martil au chenal d'Alboran. Ce constat permet de penser que l'essentiel de l'alimentation en sédiments provenait du Rif et de la marge qui a, à plusieurs reprises, été exposée à l'érosion consécutivement aux baisses du niveau marin. Le diapirisme alimenté par les argiles burdigaliennes, constituant les sédiments les plus anciens de la Mer d'Alboran, jouent eux aussi un rôle important dans la répartition des épaisseurs sédimentaires et l'architecture des dépôts qui les surmontent : la montée des diapirs entraîne un fluage latéral des argiles vers le centre du bassin et donc une diminution des épaisseurs sur les bordures. La réponse au vide engendré par la mobilité des argiles se fait par des failles normales dans la couverture plus récente.

Mots clés : Bassin Ouest-Alboran, Marge marocaine, Sismique réflexion, Sédimentation, Isopaques.

Abstract. The quantity and quality of seismic data now available, on the Moroccan Mediterranean margin and the West-Alboran basin, make it possible to establish a detailed cartography of the sedimentary thicknesses and to better understand their distribution and the main factors responsible for them. The sedimentary thicknesses reach their maximum at the foot of the Moroccan margin. They are distributed along an axis-oriented NNW-SSE between the Xauen bank and the Strait of Gibraltar intersected by a second axis (more important) connecting Oued Martil to the Alboran channel. This finding suggests that most of the sediment supply came from the Rif and the margin which has on several occasions been exposed to erosion following drops in sea level. The diapirism fed by Burdigalien clays, constituting the oldest sediments of the Alboran Sea, also play an important role in the distribution of sedimentary thicknesses and the architecture of the deposits which surmount them : the rise of the diapirs causes a creep of the clays towards the center of the basin and therefore a reduction in thicknesses on the edges. The response to the vacuum generated by the mobility of the clays is through normal faults in the more recent cover.

Keywords : West-Alboran basin, Moroccan margin, Seismic reflection, Sedimentation, Iopach.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

The Alboran Sea is located at the western end of the Mediterranean Sea, landlocked within the Bético-Rif orogen. It extends between the Strait of Gibraltar to the west and the Algerian-Balearic basin (Fig. 1) to the east. To the north and to the south, it is bordered respectively by the Betic Cordilleras, the Rif and the Western Tell, where it is evolved in a context dominated by the convergence between the Eurasian and African plates. The sedimentary cover has benefited only from a few studies which, moreover, mainly concerned the Plio-Quaternary filling. In addition, these studies focused more on the West-Alboran basin while its Moroccan margin remains relatively little studied. We therefore undertook a mapping of the thicknesses of the entire sediment filling in order to better understand the sediment distribution and the main factors that cause it.

The West-Alboran basin appears as a depression parallel to the Moroccan margin. Its maximum depth (around 1500

m) is in the SW part ; at the foot of the Alboran Ridge, which gives it an asymmetrical appearance. The eastern part of this basin is hilly by numerous acoustic base rises, essentially metamorphic in nature. The southern margin of the West-Alboran basin extends over almost 50 km in width, is characterized by a morphology composed of four units arranged in a staircase :

-A continental shelf (PC), wide, on average about 8 km, located between 0 and -120 m. The topographical irregularities that characterize the area are associated with the rocky promontories, which are distributed along the coast between Ceuta (Sebta) Canyon and Cabo Negro.

-A Proximal continental slope (PCP), which extends for almost 3 km between -120 m and -300 m ;

-A marginal shelf (PM), which is about 40 km wide, constitutes the dominant morphological unit of the Moroccan western margin. It is present over the entire southern margin of the West-Alboran basin between -300 m to -500 m.

-The junction with the basin is provided by a second slope (PCD = diſtal continental slope) which extends between -500 m and -1000 m over approximately 10 km.

This work is based on the use of a dense gride of 2D industrial reflection seismic profiles, collected within the framework of oil and academic research. The objective of this study is to show the evolution in space of the sediment cover and to underline the factors which have played a more or less preponderant role in its organization.

In the Weſt-Alboran basin, the sediment filling is known in these broad lines. The sedimentary cover overlays the metamorphic basement and its thickness is eſtimated at more than 12 km. Access to Conoco Phillips seismic data made it possible to realize that the sediment filling in the Weſt-Alboran basin contrasts with that encountered in the South-Alboran basin where it does not exceed 4 km.

The isopach map produced at the scale of the study area and the seismic profiles show a very irregular distribution of sedimentary cover : the moſt important deposit centers occupy the bottom of the Weſt-Alboran basin and the outer part of the marginal shelf, whereas on the Moroccan continental shelf and the shoals, the sedimentary cover is generally thin or even sometimes absent. The isopach map also shows a second axis of the deposit centers, which connects Oued Martil to the Alboran channel. This zone is crossed by the province of diapirs, whose direction is NNW-SSE. The marginal plateau on the Moroccan margin shows a thick sedimentary construction. The fact that it is crossed by diapirs atteſts that the sedimentary column is complete and it is supplied by Burdigalian clays.

In this basin, the firſt sediments deposited are attributed to the lower Miocene. They are made of sub-compacted clays, which fed the diapiric field of the Alboran Sea and impacted the architecture of more recent deposits. Seismic industrial

reflection shows that in the center of the basin, the thickness of the sediment cover can exceed 11 km made of six units separated by discontinuities of tectonic and / or erosional origin.

At the level of the Weſt-Alboran basin and the Moroccan margin, the sedimentary cover is formed by Miocene and Plio-Quaternary deposits in the diſtal part (formed by the marginal plateau and the diſtal continental slope). Moreover, the Messinian deposits are absent and the erosion that characterized this period has removed the upper part of the Tortonian.

The continental shelf is characterized by discontinuous sedimentation. It's almost absent on certain shoals, record an accumulation of several hundred meters in the extension of the Neogene basins of the Weſtern Rif. In this area the structuring of the basement plays an important role in the distribution of sedimentary thicknesses.

At the level of the continental shelf and the proximal continental slope, the sedimentary series is no longer represented by plio-Quaternary deposits except in the extension of the Oued Laou basin, where Miocene sedimentation is present.

According to these results, it appears that the distribution of sediments on the weſtern Mediterranean margin of Morocco is controlled by the morphology of the basement is an important factor controlling the distribution of sediments : the deep parts receive fullereſt and thickeſt series. The axis of sedimentation that a previous work oriented NNW-SSE is not the main axis. The isopach map reveals that the axis running from Oued Laou to the Alboran channel is the moſt important. This probably indicates the exiſtence of a deep corridor of the same orientation.

INTRODUCTION

De nombreuses études ont été consacrées à la Mer d'Alboran. Elles ont porté, pour l'essentiel, sur l'évolution géodynamique et structurale de cet espace situé dans un contexte complexe entre les plaques eurasienne et africaine. Dans le bassin Oueſt-Alboran, la couverture sédimentaire n'a bénéficié que de peu d'études (Jurado et Comas 1992, Bourgois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1992, Soto *et al.* 1996, Comas *et al.* 1997, Booth-Rea *et al.* 2007, Iribarren *et al.* 2009, Soto *et al.* 2010, Medaouri *et al.* 2014) qui ont porté, pour l'essentiel, sur la partie profonde du bassin. Elles ont de surcroît principalement concerné le remplissage plio-quaternaire plus accessible par la sismique réflexion haute résolution. Le travail que nous présentons eſt basé sur l'analyse des données de sismique réflexion réalisées sur la marge marocaine et le bassin Oueſt-Alboran et compilés dans une base Kingdom-suite. La transformation du temps de propagation des ondes sismiques en profondeurs eſt faite sur la base d'une vitesse moyenne de 2000m/s.

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Entièrement enclavée dans le système orogénique alpin, la Mer d'Alboran occupe la partie la plus occidentale de la Mer Méditerranée (Fig. 1). Elle s'étend plus exactement entre le détroit de Gibraltar à l'oueſt et le bassin algéro-baléaire à l'eſt. Au nord et au sud, elle eſt bordée respectivement par les cordillères bétiques, le Rif et le Tell occidental.

L'ensemble de la région évolue dans un contexte géodynamique dominé par la convergence entre les plaques africaine et eurasienne (Dillon *et al.* 1980, Dewey *et al.* 1989) depuis le Crétacé (Dercourt *et al.* 1986, Dewey *et al.* 1989), ce qui a conduit au soulèvement des chaînes alpines autour de la Méditerranée et plus tardivement (au Miocène inférieur) à l'ouverture de la mer d'Alboran. Cette dernière étant par ailleurs établie sur une croûte continentale amincie (Argus *et al.* 1989, DeMets *et al.* 1990, Serpelloni *et al.* 2007), son ouverture dans un tel contexte (au lieu d'une chaîne de collision) paraît comme une anomalie géologique.

Le bassin Oueſt-Alboran a été le premier à s'ouvrir, pendant la phase d'extension qui a commencé il y a environ 20 Ma (Comas *et al.* 1992, Watts *et al.* 1993, Soto *et al.* 1996, 2010, Chalouan *et al.* 1997, 1999, Mauffret *et al.* 2007, Iribarren *et al.* 2009). Selon certains auteurs ((Mauffret *et al.* (2004, 2007), Rosenbaum *et al.* (2002), Spakman et Wortel (2004)), il s'agirait d'un bassin allochtone qui se serait déplacé sur environ 500 à 600 km vers le SW pour atteindre sa position actuelle.

Le bassin Sud-Alboran s'ouvrirait plus tard au Tortonian (Ammar *et al.* 2003) en même temps que les bassins néogènes de Boudinar et Melilya-Nador (Guillemin et Houzay 1982) dans un contexte géologique caractérisé par l'inversion tectonique (Comas *et al.* 1992, 1999, Chalouan *et al.* 1997, Mauffret *et al.* 2007), lui-même guidé principalement par le recul du plan de subduction de la Méditerranée occidentale (Do Couto *et al.* 2016). L'ouverture de ce bassin

s'accompagne d'importantes manifestations volcaniques (Hoernle *et al.* 1999, Duggen *et al.* 2004, 2008, Ammar *et al.* 2007), particulièrement abondantes dans le centre et l'Est de la Mer d'Alboran (Galdeano *et al.* 1974, Willet 1997).

La morphologie actuelle de la Mer d'Alboran est la conséquence à la fois de l'héritage ancien et de l'évolution structuro-sédimentaire miocène et plio-quaternaire.

CADRE MORPHOLOGIQUE

La mer d'Alboran se constitue (IOC-UNESCO) de trois bassins séparés par la Ride d'Alboran (Fig. 2) qui se prolonge vers l'Oueſt par les bancs de Tofino et Xauen. Ces deux ensembles présentent des orientations différentes : la

Ride d'Alboran est formée par un ensemble de hauts-fonds alignés selon une direction NE-SW entre la marge marocaine et le bassin Est d'Alboran qui en constitue la seule partie émergée, les bancs de Tofino et Xauen, situés en face de la côte marocaine, montrent une orientation E-W.

Récemment, la bathymétrie de la marge Nord a été précisée suite aux levés multifaisceaux (Gràcia *et al.* 2006, Ballesteros *et al.* 2008). Au niveau de la marge méditerranéenne du Maroc, une opération similaire a été réalisée, en 2012, le long des Bokoyas et étendue vers l'Est, jusqu' au large de Ras Tarf (D'acremont *et al.* 2014, Lafosse *et al.* 2018).

Le bassin Oueſt-Alboran, qui nous intéresse plus particulièrement (Fig. 2), se situe entre la Ride d'Alboran et

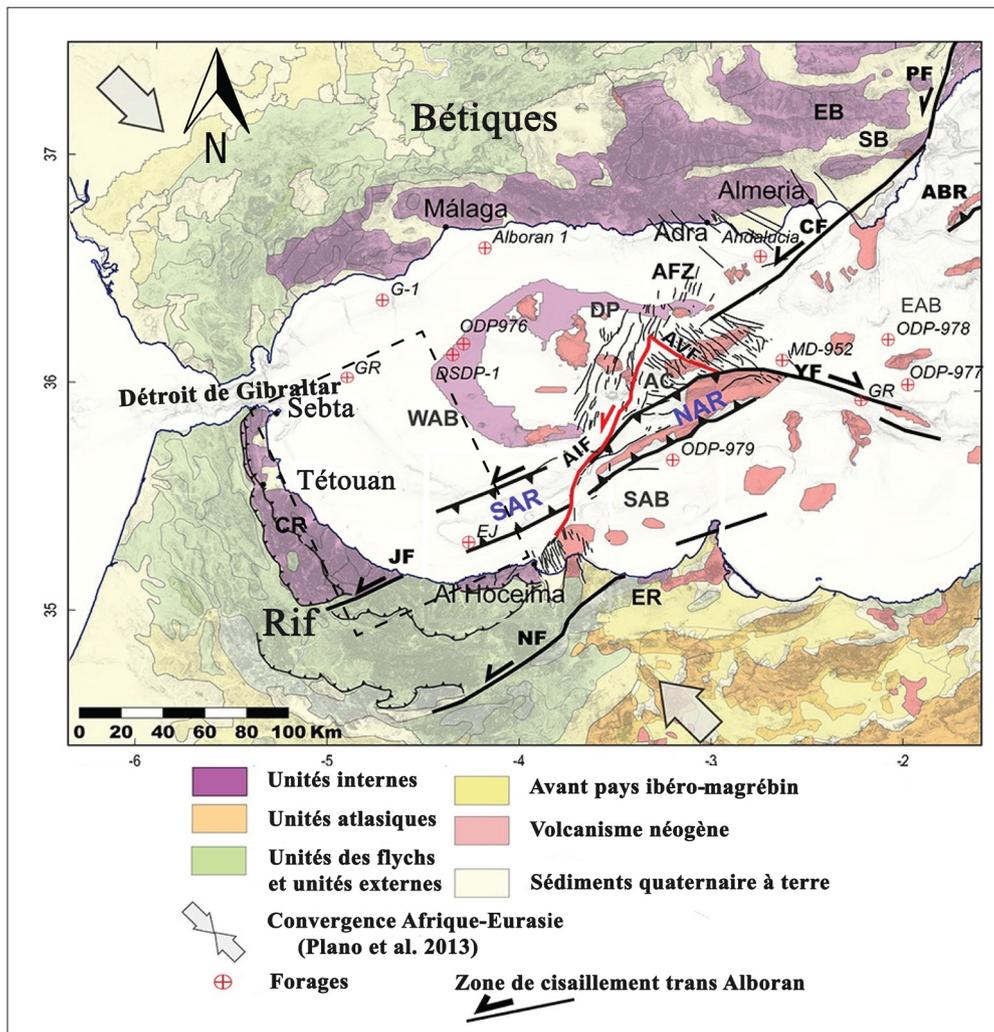


Figure 1. Carte géologique de la Mer d'Alboran (Bourgeois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1999, Leblanc et Olivier 1984, Romagny *et al.* 2014, Lafosse *et al.* 2020) ; modifiée. La carte montre une morphologie complexe répartie entre bassins et hauts-fonds. WAB : bassin Oueſt-Alboran ; EAB : bassin Est-Alboran ; SAB : bassin Sud-Alboran ; AC : Chenal d'Alboran ; AFZ : Zone de Failles Adra ; AVR : Faille d'Averroes ; ABR : Ride d'Abubacer ; CF : Faille de Carboneras ; CR : Rif central ; DJ : Plateau de Djibouti ; EB : Bétique oriental ; AIF : Faille AL-Idrissi ; ER : Rif Oriental ; JF : faille de Jebha ; NF : faille du Nekor ; SAR : Ride d'Alboran Sud ; SB : Bassin de Sorbas ; NAR : Ride d'Alboran Nord ; YF : Faille de Youssouf. TASZ : La zone de cisaillement trans-Alboran indique le mouvement déduit pour la période Miocène supérieur - Pliocène. Les failles rouges sont la faille AL-Idrissi active actuelle et sa faille conjuguée Averroes.

Figure 1. Geological map of Alboran Sea (Bourgeois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1999, Leblanc and Olivier 1984, Romagny and al. 2014, Lafosse *et al.* 2020) ; modified. The map shows a complex morphology distributed between basins and shoals. WAB : West Alboran basin ; EAB : Eastern Alboran basin ; SAB : South Alboran basin ; AC : Alboran Channel ; AFZ : Adra Fault zone ; AVR : Averroes Fault ; ABR : Abubacer Ridge ; CF : Carboneras Fault ; CR : central Rif ; DJ : Djibouti Plateau ; EB : eastern Betic ; EAB : East Alboran basin ; AIF : AL-Idrissi Fault ; ER : eastern Rif ; JF : Jebha Fault ; NF : Nekor Fault ; SAR : South Alboran Ridge ; SB : Sorbas basin ; NAR : North Alboran Ridge ; YF : Yusuf Fault. The Trans-Alboran shear zone (TASZ) indicates the motion inferred for the late Miocene – Pliocene period. The red faults are the present-day active AL-Idrissi Fault and its conjugated Averroes Fault.

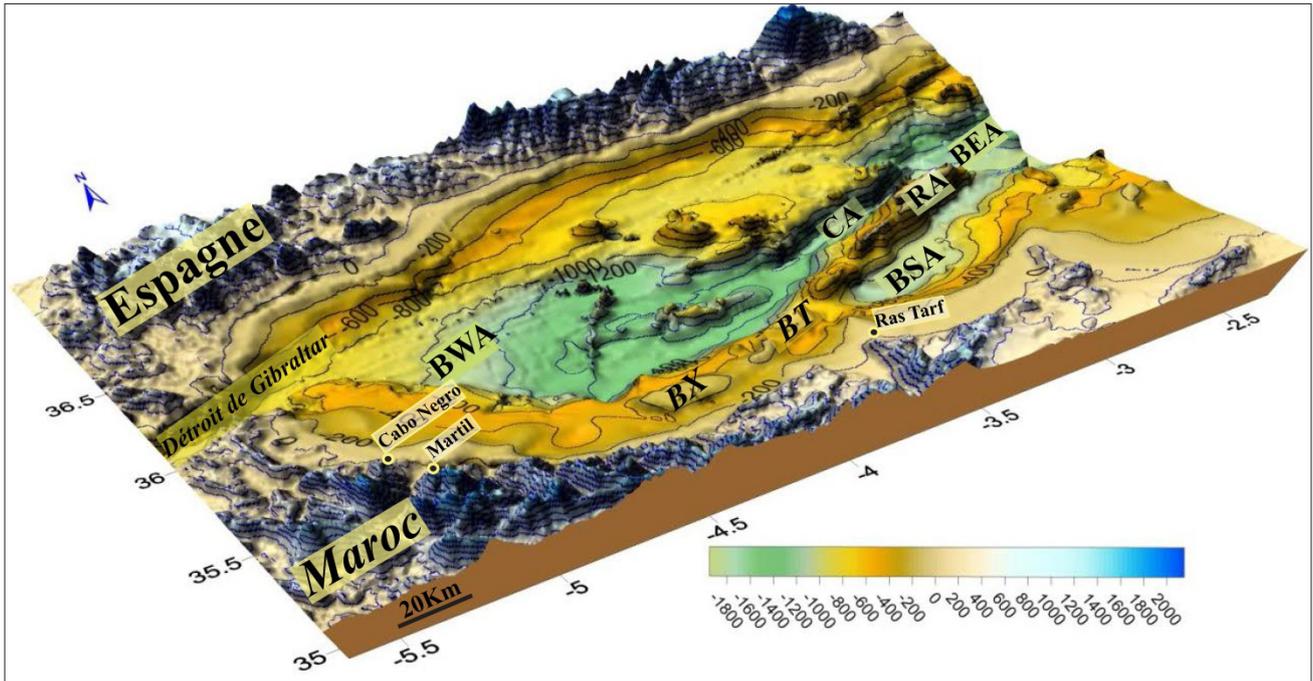


Figure 2. Physiographie de la Mer d'Alboran. BWA : bassin Oueſt-Alboran ; BEA : bassin Eſt-Alboran ; BSA : bassin Sud-Alboran ; BX : Banque de Xauen ; BT : Banc de Tofiño ; RA : Ride d'Alboran ; CA : Chenal d'Alboran.

Figure 2. Physiographic of the Alboran Sea. BWA : West Alboran basin ; BEA : Eastern Alboran basin ; BSA : Southern Alboran basin ; BX : Xauen Bank ; BT : Tofiño Bank ; RA : Alboran Ridge ; CA : Alboran Channel.

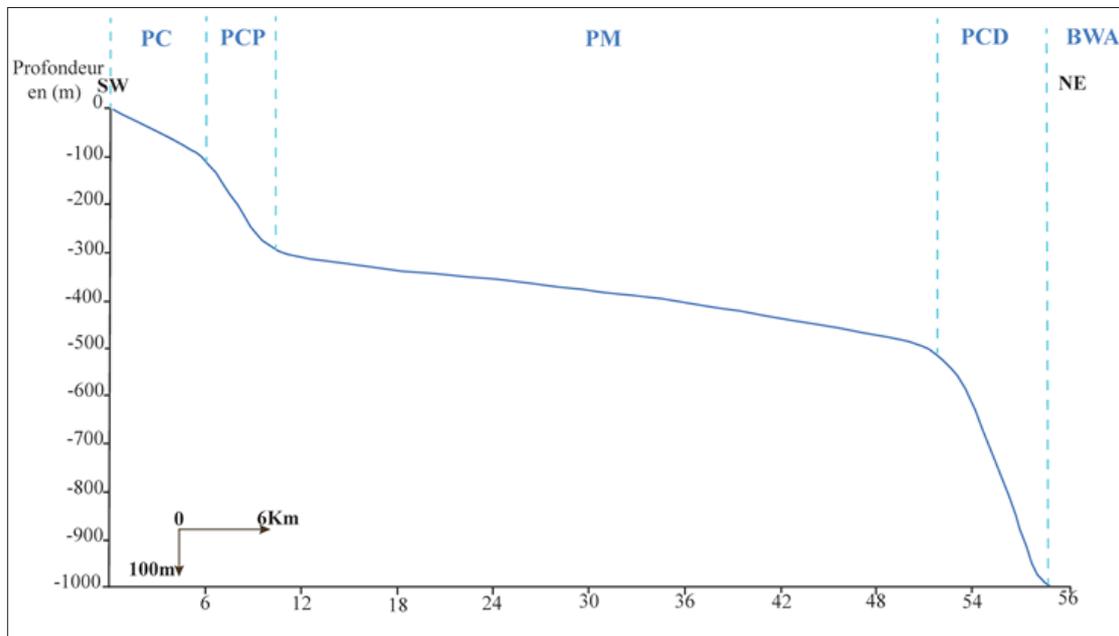


Figure 3. Morphologie de la marge occidentale marocaine ; PC : Plateau Continental ; PCP : Pente Continentale Proximale ; PM : Plateau Marginal ; PCD : Pente Continentale Distale ; BWA : Bassin Oueſt-Alboran.

Figure 3. Morphology of the Moroccan western margin ; PC : Continental shelf ; PCP : Proximal continental slope ; PM : Marginal shelf ; PCD : Distal continental slope ; BWA : West Alboran basin.

les bancs de Xauen et Tofiño au SE et le détroit de Gibraltar au NW. Sa marge marocaine orientée NW-SE constitue le prolongement en mer du Rif occidental. Le bassin Oueſt-Alboran (Bourgeois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1992, Jurado et Comas 1992) se présente comme une dépression parallèle à la marge marocaine (Fig. 2). Sa profondeur maximale, d'environ 1500 m, se situe dans la partie SW, au pied de

la Ride d'Alboran. La partie orientale est accidentée par de nombreuses remontées de socle acoustique, de nature essentiellement métamorphique. La jonction avec le Rif est faite par une marge qui ne montre pas une morphologie classique. En effet, une coupe bathymétrique, réalisée perpendiculairement à celle-ci, entre Cabo Negro et Martil (Fig. 3), montre que cette marge qui s'étend sur presque 50

km de largeur, se caractérise par une morphologie composée de quatre unités disposées en marche d'escalier. Il s'agit de :

- Une plateforme continentale (PC), large, en moyenne d'environ 8 km, située entre 0 et -120 m. Les irrégularités topographiques qui la caractérisent sont associées aux promontoires rocheux qui s'avancent en mer et au Canyon de Sebta, situé entre Cabo Negro et Sebta ;

- Une pente continentale (PCP), qualifiée de proximale qui s'étend sur presque 3 km entre -120 m et -300 m ;

- Un plateau marginal (PM) qui, avec une largeur de 40 km, constitue l'unité morphologique dominante de la marge occidentale marocaine. Il est présent sur toute la marge méridionale du BWA entre -300 m à -500 m.

- La jonction avec le bassin qui est assurée par une deuxième pente (PCD = pente continentale distale) qui s'étendant entre -500 m et -1000 m sur environ 10 km.

DONNEES ET METHODES

Ce travail s'appuie sur l'exploitation d'une maille dense de profils de sismique réflexion industrielle 2D (Fig. 4), collectés dans le cadre de la recherche pétrolière et académique. Il s'agit des profils MO75 réalisés par CHEVRON OIL (1975) ; Shell (1975), BRPM (1980), ALBOMAR réalisés par ENIEPSA (1981), IZD et TSH réalisés par AMOCO OIL (1982 et 1983), et CAB réalisés par CONOCO PHILLIPS (2000 et 2001). La pénétration de la sismique étudiée atteint 8 secondes temps double pour les profils pétroliers les plus récents, ce qui permet de visualiser la totalité de la colonne sédimentaire. Le calage stratigraphique est fait à partir des forages pétroliers (Andalucia G-1) et ODP Pétroliers (Andalucia G-1) et ODP 976 de la marge espagnole et étendu à la marge marocaine, grâce aux recoupements entre les données sismiques espagnoles et marocaines. Son extension à l'ensemble de la région est rendue possible grâce à la bonne continuité des

réflecteurs sismiques et la densité de la maille disponible. Un autre repère stratigraphique, facilement reconnaissable dans toute la Méditerranée (Auzende *et al.* 1971, 1975, Mulder et Parry 1977, Mauffret *et al.* 1978, Genesseeux et Lefebvre 1980, Barber 1981, Réhault *et al.* 1984, Campillo *et al.* 1992, Gorini 1993, Ben-Avraham *et al.* 1995, Comas *et al.* 1999, Guennoc *et al.* 2000, Maillard *et al.* 2006, Bertoni et Cartwright 2007, Lofi *et al.* 2010, Lofi *et al.* 2011, Urgeles *et al.* 2011), est utilisé ; il s'agit de la limite entre le Miocène et le Plio-Quaternaire. Sur la sismique réflexion, cette limite est soulignée par un réflecteur de forte amplitude et de bonne continuité générale et souvent surmonté par un faciès sismique relativement transparent. Il faut toutefois signaler que le forage El Jebha n'a pas été utilisé, parce qu'il a été planté sur le banc de Xauen où la stratification est très perturbée par la tectonique.

Le but de cette étude est de montrer l'évolution dans l'espace de la couverture sédimentaire et de souligner les facteurs qui ont joué un rôle plus ou moins prépondérant dans cette organisation.

LE REMPLISSAGE SEDIMENTAIRE

Dans le bassin Oueſt-Alboran le remplissage sédimentaire est connu dans ses grandes lignes (Bourgeois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1992, Jurado et Comas 1992). La couverture sédimentaire repose, ici, sur un socle métamorphique et son épaisseur était estimée à 8 km (Medaouri *et al.* 2014). L'accès aux données sismiques Conoco Phillips a permis de se rendre compte que le remplissage sédimentaire du bassin Oueſt-Alboran est beaucoup plus important et peut dépasser localement 12 km d'épaisseur (Ammar *et al.* 2007). Cette épaisseur contraste avec celle rencontrée dans le bassin Sud-Alboran où elle ne dépasse pas 4 km (Comas *et al.* 1995, Booth-Rea *et al.* 2007, Mauffret *et al.* 2007, Medaouri *et al.* 2012, Martínez-García *et al.* 2013).

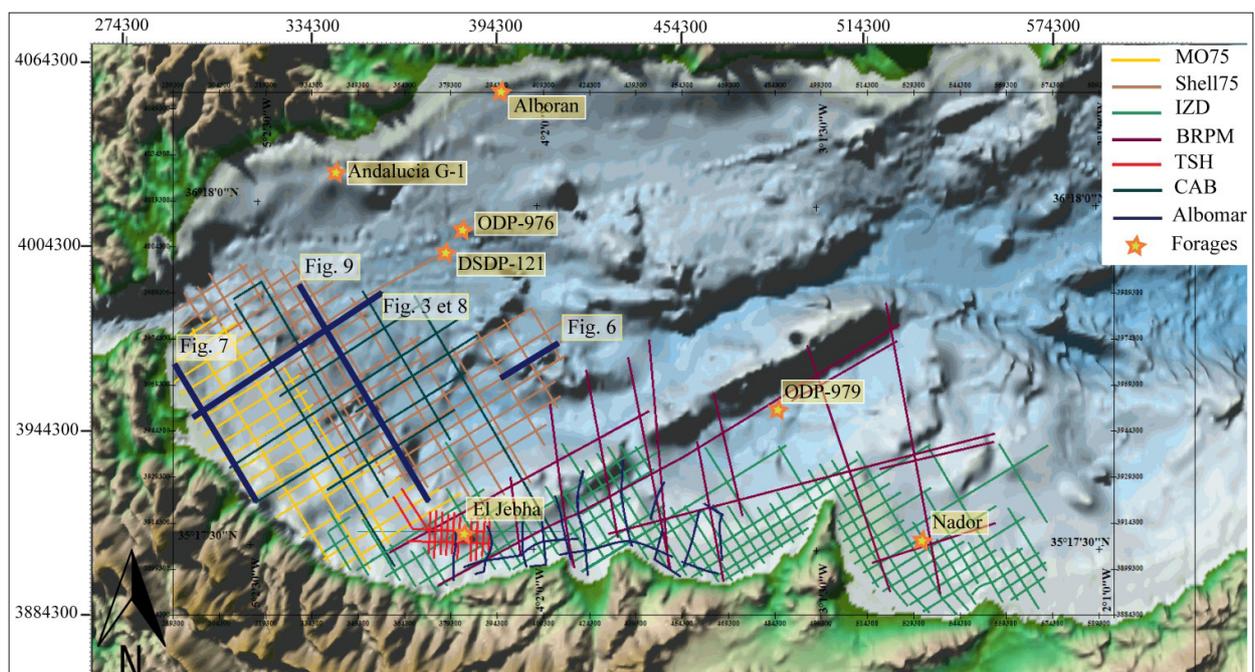


Figure 4. Situation des profils sismiques disponibles sur la marge marocaine et forage en Mer d'Alboran. Les données sismiques sont au format SEG Y et gérées par le logiciel Kingdom Suite.

Figure 4. Situation of the seismic profiles available on the Moroccan margin and drilling in the Alboran Sea. The seismic data are in SEG Y format and managed by Kingdom suite software.

La carte isopaque réalisée à l'échelle de la zone d'étude (Fig. 5) et les profils sismiques (Figs. 6-7) rendent compte d'une couverture sédimentaire très inégalement répartie : les centres de dépôt les plus importants occupent le fond du bassin Oueſt-Alboran et la partie externe du plateau marginal, alors que sur le plateau continental marocain et les hauts-fonds, la couverture sédimentaire est globalement faible, voire parfois absente. Les anciens travaux (Bourgeois *et al.* 1992, Comas *et al.* 1992, Jurado et Comas 1992), soulignaient un seul axe de dépôts orienté NNW-SSE comme celui de la province diapirique. La carte des isopaques (Fig. 5) fait ressortir un deuxième axe de dépôts qui relie Oued Martil au chenal d'Alboran.

Au niveau la plate-forme continentale, la carte isopaque et les coupes sismiques (Figs. 5-7) montrent une sédimentation discontinue dans la mesure où les dépôts, quasiment absents sur certains hauts-fonds, enregistrent une accumulation de plusieurs centaines de mètres dans le prolongement des bassins néogènes du Rif occidental (Bassins d'Oued Laou et Oued Martil), attestant ainsi que la structuration tectonique du socle joue un rôle important dans la distribution des épaisseurs sédimentaires.

Plus au large, sur le plateau marginal (Fig. 3), la couverture sédimentaire s'épaissit rapidement (Fig. 8). La carte des épaisseurs, que nous avons établie (Fig. 5), montre un accroissement de la côte vers le centre du bassin. Elle passe de quelques dizaines de mètres sur la plate-forme interne à plus de 12 km dans le centre du bassin.

Cet épaississement brutal de la sédimentation s'accompagne de manifestations diapiriques au niveau du plateau marginal externe et surtout dans le bassin. Ces diapirs sont alimentés par les argiles du Burdigalien. La colonne sédimentaire comporte des séquences transgressives ou régressives, les unes par rapport aux autres, nettement visibles au niveau de la marge (Fig. 8). La colonne sédimentaire la plus complète ne se rencontre donc que dans le bassin. Elle va des argiles burdigaliennes constituant les sédiments les plus anciens de la mer d'Alboran jusqu'au séries quaternaires.

DISCUSSION

Dans le bassin Oueſt-Alboran, les premiers sédiments déposés sont attribués au Miocène inférieur (Jurado et Comas 1992). Ils sont constitués d'argiles sous compactées, qui ont alimenté le champ diapirique (Figs. 5-9) de la Mer d'Alboran. Ces argiles, présentes uniquement dans le bassin Oueſt-Alboran, ont impacté à la fois l'évolution des épaisseurs et l'architecture des dépôts plus récents. En effet ces argiles ont fait l'objet de fluage latéral qui a causé une diminution de l'épaisseur sédimentaire sur les bordures. Le vide laissé par ce déplacement latéral des argiles est compensé par un effondrement de la couverture plus récente comme l'atteste la présence de failles normales visibles sur les profils uniquement dans la zone des diapirs. Au niveau du plateau marginal externe et du bassin, le fluage des argiles se fait vers le haut et rebrousse les séries sédimentaires traversées modifiant ainsi leur architecture.

La sismique réflexion industrielle montre que dans le centre du bassin (Fig. 9), l'épaisseur de la couverture sédimentaire peut dépasser 12 km. Les travaux de Comas *et al.* (1992) y ont distingué six unités séparées par des discontinuités (Fig.

10) d'origine tectonique et/ou érosionnelle dont la plus remarquable est la surface d'érosion messénienne.

Au niveau du bassin Oueſt-Alboran et de la marge marocaine, la couverture sédimentaire est formée de dépôts miocènes et plio-quaternaires dans la partie distale (formée par le plateau marginal et la pente continentale distale). En Mer d'Alboran, l'érosion était la principale caractéristique pendant que les parties profondes de la Méditerranée recevaient des dépôts important de sels. L'importance de l'érosion est également à l'origine de la disparition d'une partie plus ou moins importante du Tortonien.

Au niveau du plateau continental et de la pente continentale proximale, la série sédimentaire n'est plus représentée que par les dépôts plio-quaternaires (Fig. 8) sauf dans le prolongement du bassin de l'Oued Martil où une sédimentation miocène est présente (Fig. 7). Ceci suppose que cette zone constituait un bras de mer occupant le graben le plus profond de cette zone.

En se basant sur les résultats susmentionnés et la comparaison avec la morphologie du substratum (Fig. 11) réalisée à partir des profils de sismique réflexion (Stich *et al.* 2003a, Buform *et al.* 2004, Akoglu *et al.* 2006, Biggs *et al.* 2006, Cakir *et al.* 2006, Stich *et al.* 2006, Ammar *et al.* 2007, Serpelloni *et al.* 2007), il ressort que la répartition des sédiments sur la marge ouest méditerranéenne du Maroc est contrôlée essentiellement par cette dernière. En effet, les parties profondes abritent la série la plus complète et la plus épaisse. L'axe de la sédimentation que les travaux antérieurs orientaient NNW-SSE n'est pas l'axe principal. La carte des isopaques révèle que l'axe allant de l'Oued Laou au chenal d'Alboran est le plus important. Ceci indique probablement l'existence d'un couloir profond de même orientation.

En allant vers la côte, la série sédimentaire voit son épaisseur diminuer : les niveaux miocènes sont généralement absents soit parce qu'ils n'ont jamais été déposés soit parce qu'ils ont été érodés. L'explication la plus plausible reste le non dépôt, vu que les terminaisons latérales des réflecteurs sismiques sont de type « onlap », ce qui traduit d'une part un phénomène transgressif et d'autre part un élargissement du domaine marin.

La tectonique a dû jouer un grand rôle également dans cette répartition en conditionnant la morphologie du substratum, la fermeture des communications entre l'Océan Atlantique et la Mer Méditerranée (donc la CSM), puis leur rétablissement à travers le Détroit de Gibraltar et la structuration en horsts et grabens de la marge proximale. En plus de la tectonique au sens strict, une deuxième tectonique que nous appellerons « diapirique », enracinée dans la base du remplissage, structure la couverture plus récente. Son évolution latérale et verticale s'accompagne respectivement de failles verticales épidermiques au niveau de la marge et de déformations souples des séries traversées par les diapirs dans le bassin.

Les variations eustatiques du niveau marin sont un autre facteur qui a impacté la sédimentation. En dehors de la base argileuse chaotique, la série sédimentaire se caractérise par des unités transgressives séparées par des surfaces d'érosion dues aux bas niveaux marins. L'érosion généralisée et paroxysmale au Messinien devient localisée au Plio-Quaternaire et souvent en relation avec les oueds côtiers. La couverture sédimentaire est réduite sur le plateau continental actuel où elle n'est plus représentée que par les dépôts plio-quaternaires.

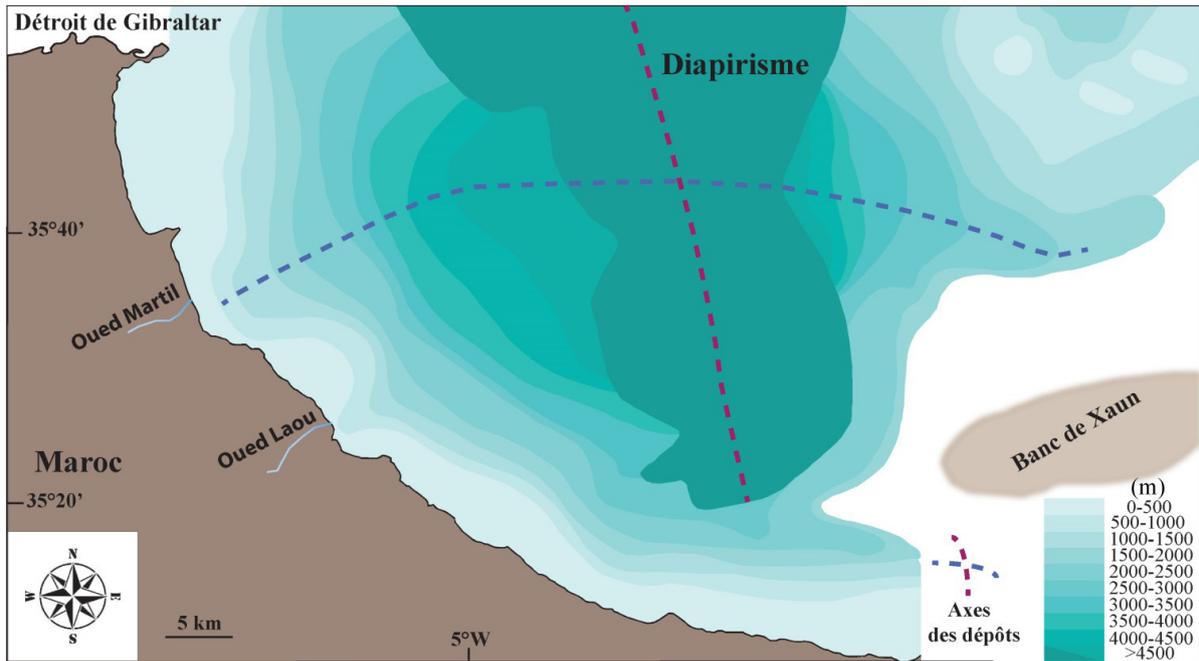


Figure 5. Carte isopaque, effectuée à partir des profils sismiques, montrant la répartition spatiale du remplissage sédimentaire et l'orientation des centres de dépôts.

Figure 5. Isopach map, produced from seismic profiles, showing the spatial distribution of the sediment filling and the orientation of the deposit centers.

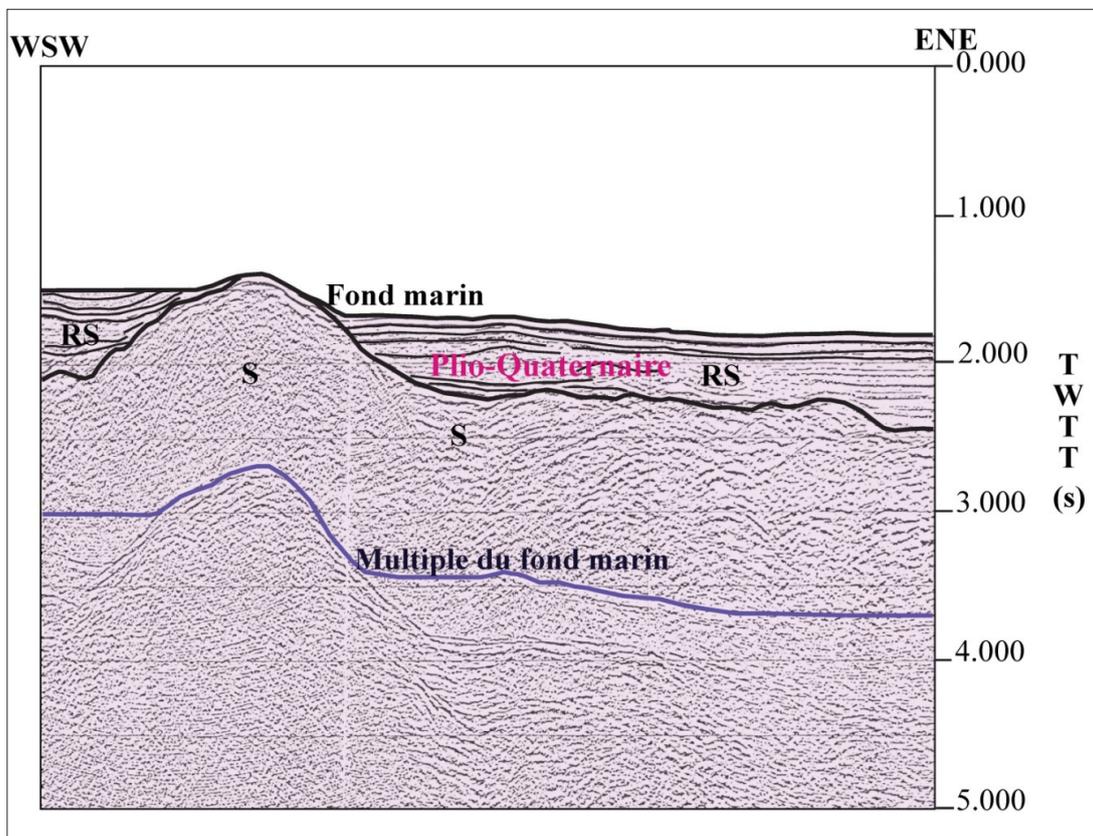


Figure 6. Profil sismique (position Fig. 4) montrant l'absence ou la faiblesse des dépôts sédimentaires dans la partie orientale du bassin Oueſt-Alboran. S : Substratum ; RS : Remplissage sédimentaire

Figure 6. Seismic profile (position Fig. 4) showing the absence or weakness of sedimentary deposits in the eastern part of the West-Alboran basin. S : Basement ; RS : Sediment filling.

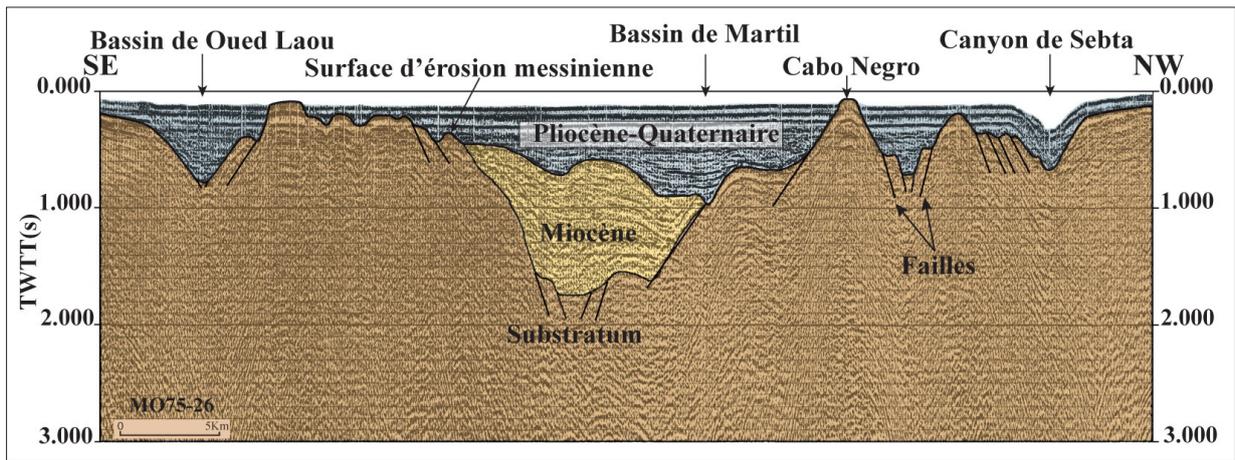


Figure 7. Evolution des épaisseurs de la couverture sédimentaire sur le plateau continental : la coupe sismique (position Fig. 4) montre une structuration du substratum en horsts et grabens de profondeurs variables. A l'exception du graben de l'Oued Martil où elle comporte des dépôts miocènes et plio-quaternaires, la couverture sédimentaire représentée est réduite aux dépôts plio-quaternaires ou absente.

Figure 7. Evolution of the thickness of the sedimentary cover on the continental shelf : the seismic section (position Fig. 4) shows a structuring of the substratum in horsts and grabens of variable depths. With the exception of the Oued Martil graben, where it contains Miocene and Plio-Quaternary deposits, the sedimentary cover is reduced to Plio-Quaternary deposits or absent.

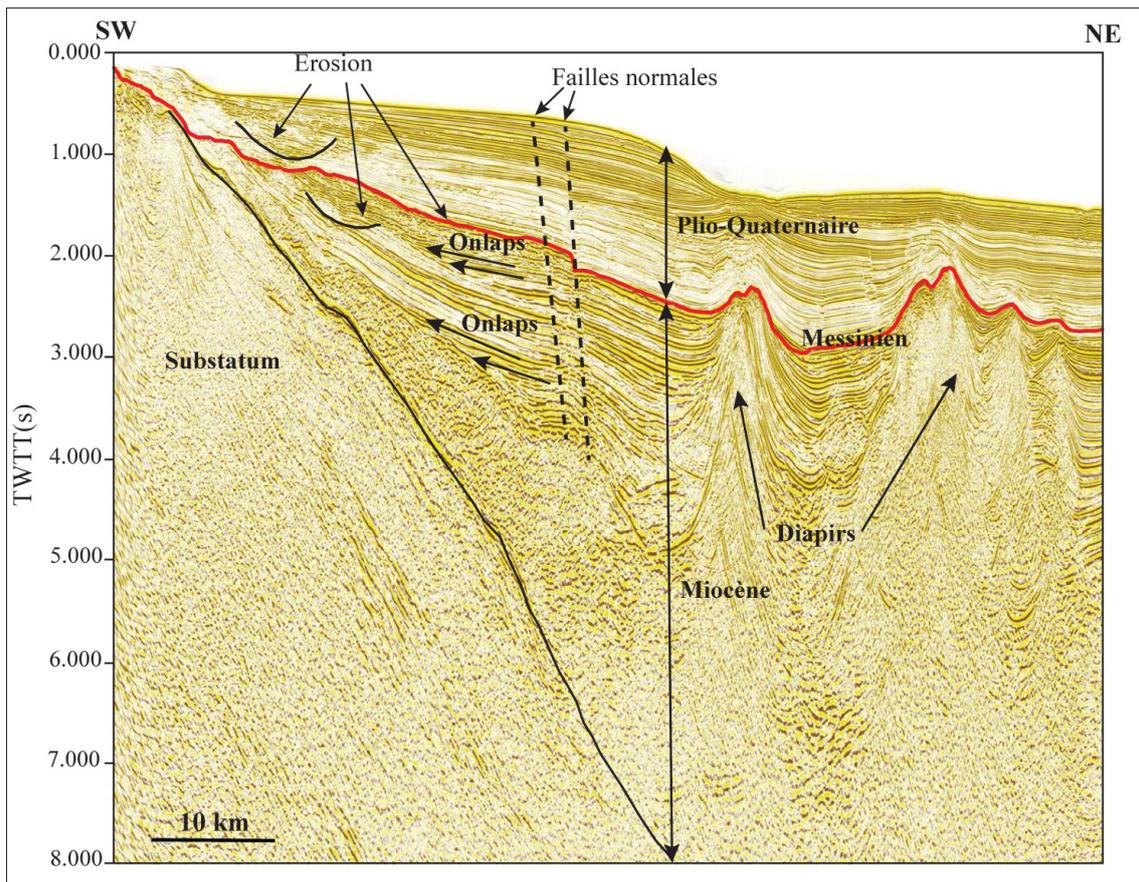


Figure 8. Profil sismique (position Fig. 4) montrant la diminution de la couverture sédimentaire du bassin vers la côte et les principaux facteurs qui contrôlent son évolution tels que : la morphologie du substratum, les variations eustatiques du niveau marin (alternance de phases d'érosion et de séquences transgressives), ainsi que la mobilité latérale et verticale des dépôts argileux responsables du diapirisme et des failles qui affectent la couverture sus-jacente.

Figure 8. Seismic profile (position Fig. 4), showing the decrease in the sedimentary cover of the basin towards the coast and the main factors controlling its evolution. The morphology of the substratum, the eustatic variations of the sea level (alternation of erosion phases and transgressive sequences), as well as the lateral and vertical mobility of the clay deposits, responsible for dipirism, and the faults that affect the overlying cover.

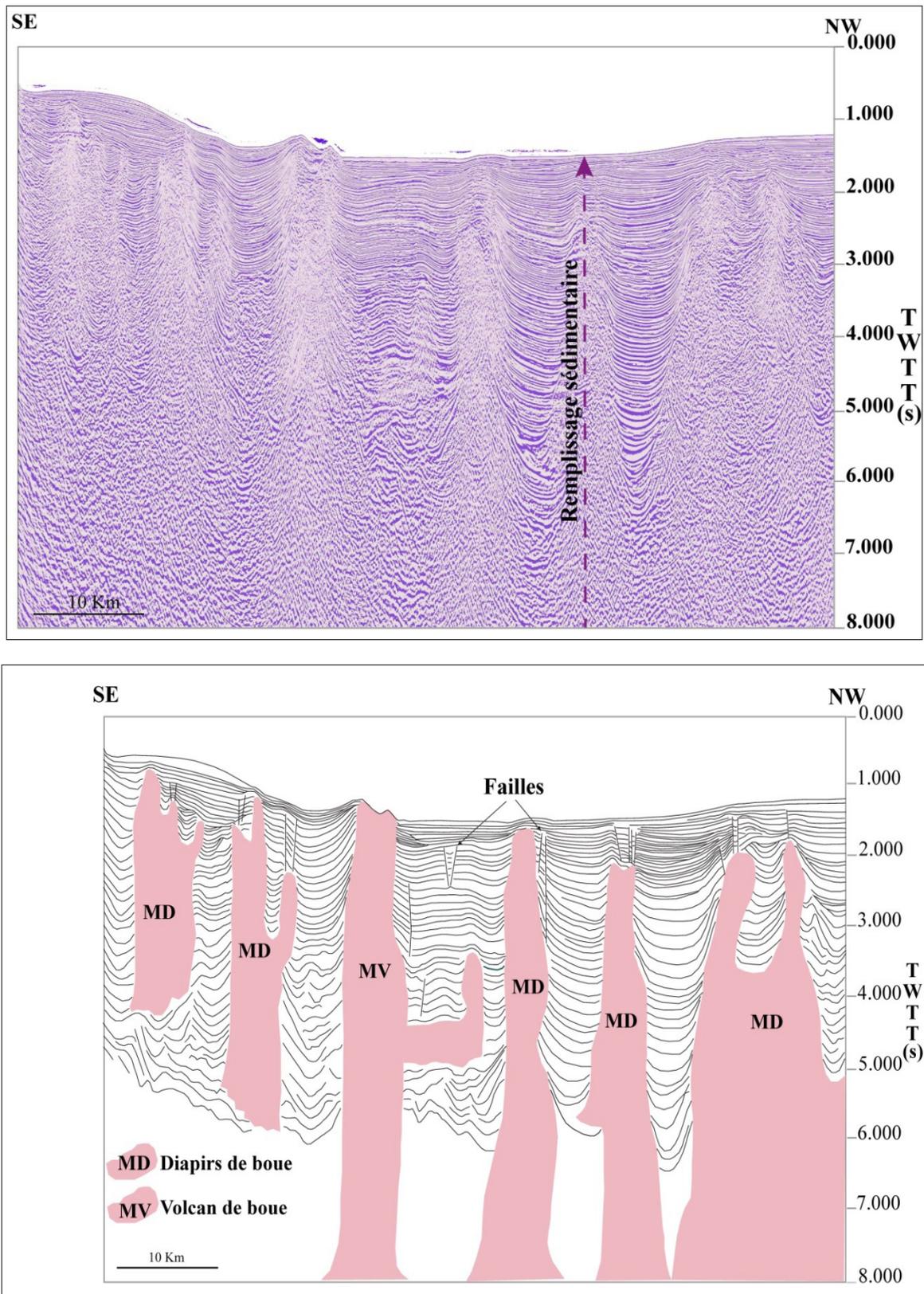


Figure 9. Profil et coupe sismique simplifiée (position Fig. 4), montrant l'importance de la couverture sédimentaire dans le bassin Oueſt-Alboran. La base du remplissage sédimentaire, étant de nature argileuse, évolue en diapirs qui influencent l'architecture et la morphologie des dépôts plus récents.

Figure 9. Profile and simplified seismic section (position Fig. 4), showing the importance of the sedimentary cover in the West-Alboran basin. The base of the sedimentary filling, being of clayey nature, evolves into diapirs which influence the architecture and the morphology of more recent deposits.

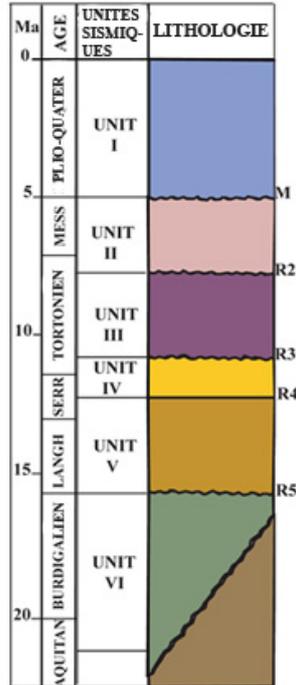


Figure 10. Unités sismo-stratigraphiques et principales limites régionales, d’après Jurado et Comas (1992) ; modifiée. M : Discordance messinienne ; R : réflecteurs correspondant aux discordances majeures dans les sédiments.

Figure 10. Seismo- stratigraphic Units and main regional boundaries, after Jurado and Comas (1992) ; modified. M : Messinian unconformity ; R : reflectors corresponding to major unconformities within sediments.

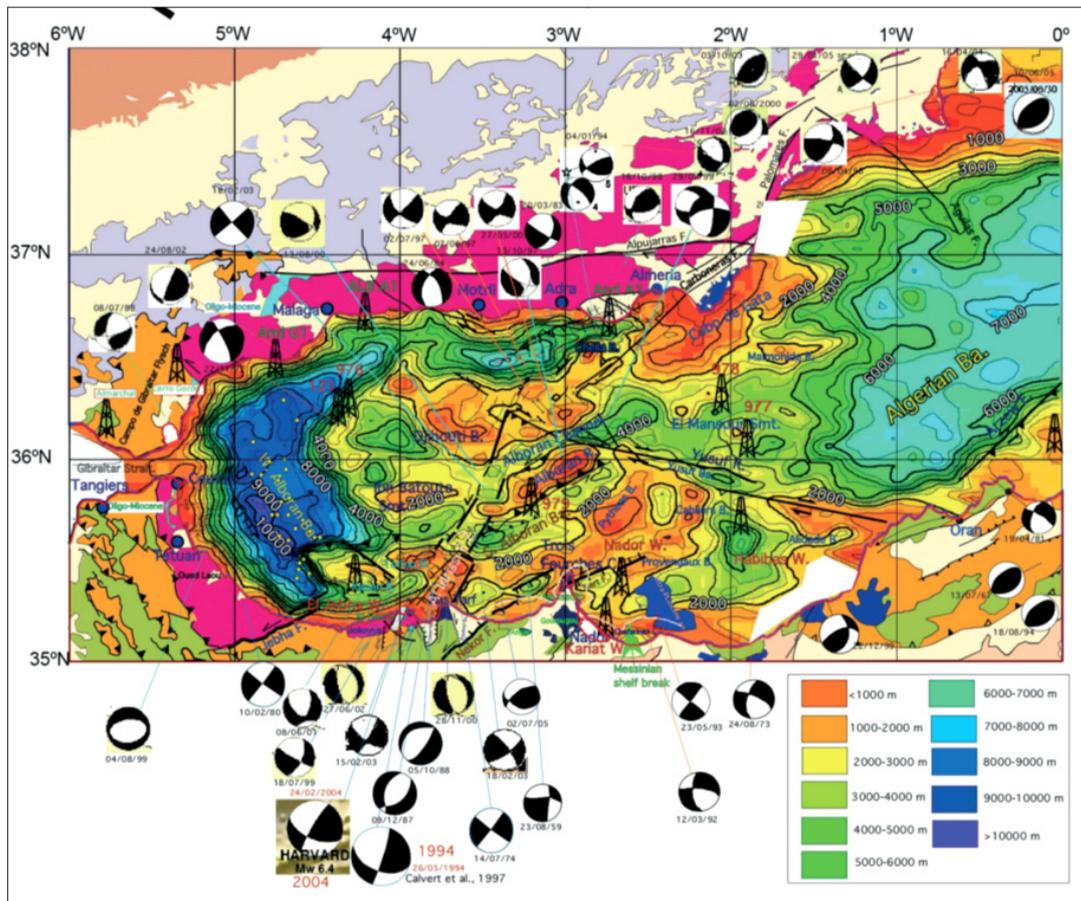


Figure 11. Carte de la profondeur du substratum en Mer d’Alboran (Stich *et al.* 2003a, Buform *et al.* 2004, Akoglu *et al.* 2006, Biggs *et al.* 2006, Cakir *et al.* 2006, Stich *et al.* 2006, Serpelloni *et al.* 2007, Ammar *et al.* 2007).

Figure 11. Basement depth map in the Alboran Sea (Stich *et al.* 2003a, Buform *et al.* 2004, Akoglu *et al.* 2006, Biggs *et al.* 2006, Cakir *et al.* 2006, Stich *et al.* 2006, Serpelloni *et al.* 2007, Ammar *et al.* 2007).

CONCLUSION

Depuis l'ouverture du bassin Oueſt-Alboran au Miocène inférieur, ce dernier est le siège d'une sédimentation remarquable pouvant dépasser 12 km dans son axe. Néanmoins, la répartition des dépôts et leur âge varient rapidement, surtout au niveau des marges. A l'échelle de la marge marocaine, l'épaisseur diminue progressivement du large vers la côte en se biseautant de la base vers le sommet. Sur le plateau continental, l'épaisseur se trouve très réduite et ne dépasse guère 500 m. En raison du biseautage de la série sédimentaire, l'âge des dépôts est globalement de plus en plus récent en allant du large vers le continent. Mais les irrégularités topographiques du substratum sont à l'origine de certaines incursions comme c'est le cas au large de l'Oued Laou. Dans le bassin, les hauts-fonds sont surmontés par une série sédimentaire faiblement épaisse et dans certains cas sans aucune couverture sédimentaire.

Les nombreuses phases d'érosion qui ont caractérisé la région depuis le Messinien ont également conditionné la répartition des sédiments. Leurs actions et intensité varient aussi bien dans le temps que dans l'espace :

Dans le temps, l'érosion messinienne est la plus spectaculaire. Celle qui a marqué le Plio-Quaternaire est relativement moins forte. Dans l'espace, nous avons constaté que l'érosion messinienne se distingue par son caractère généralisé englobant le bassin et les marges et revêt une intensité particulière en creusant des canyons au droit du détroit de Gibraltar et des oueds. Par contre, les surfaces d'érosion plio-quaternaires sont présentes essentiellement dans les parties peu profondes de la marge.

Les principaux facteurs qui ont présidé au contrôle de la sédimentation sont :

- La distribution des épaisseurs sédimentaires est fortement influencée par la morphologie du substratum comme en atteste la corrélation entre dépressions et fortes épaisseurs d'une part et hauts-fonds et faibles épaisseurs d'autre part. Il est important de souligner que la morphologie, elle-même, est le résultat d'autres facteurs dont la tectonique et l'érosion.

- L'action des variations eustatiques de la tranche d'eau est un facteur prépondérant dans la détermination des épaisseurs sédimentaires. En effet les phases de dépôt et d'érosion correspondent respectivement aux hauts et bas niveaux marins.

- Et enfin, la quantité et la qualité des sédiments : la nature argileuse des sédiments les plus anciens (Burdigaliens) du bassin Oueſt-Alboran influence l'architecture des corps sédimentaires par son comportement diapirique, la répartition des diapirs, quant à elle, est tributaire des épaisseurs des sédiments qui surmontent le réservoir argileux.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les éditeurs du Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre pour tout le travail qu'ils ont fourni. Nous remercions également les évaluateurs anonymes pour leurs précieuses remarques et suggestions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akdoglu A.M., Cakir Z., Meghraoui M. *et al.* 2006. The 1994–2004 Al Hoceima (Morocco) earthquake sequence : conjugate fault ruptures deduced from InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 252, 467–480.

- Ammar A., Tejera De Leon., El Moumni B. *et al.* 2003. La structuration de la ride d'Alboran : Une conséquence du contrôle de l'évolution du bassin d'Alboran par les discontinuités anciennes. *Notes et mémoires du Service Géologique du Maroc*, n°447, p. 51–60.
- Ammar A., Mauffret A., Gorini C. *et al.* 2007. The tectonic structure of the alboran margin of Morocco. *Revisita de la sociedad Geológica de España*, 20(3–4).
- Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. *et al.* 1989. Closure of the Africa-Eurasia-North America Plate motion circuit and tectonics of the Gloria Fault. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 94, 5585–5602.
- Auzende J.M., Bonnin J., Olivet J.L. *et al.* 1971. Upper Miocene Salt Layer in the Western Mediterranean Basin. *Nature Physical Science*, 230, 82–84.
- Auzende J.M., Rehault J.P., Paſtoret L. *et al.* 1975. Les bassins sédimentaires de la mer d'Alboran. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 17, 571–580.
- Ballesteros M., Rivera J., Muñoz A. *et al.* 2008. Alboran Basin, southern Spain. Part II : Neogene tectonic implications for the orogenic float model. *Marine and Petroleum Geology*, 25, 75–101.
- Barber P.M. 1981. Messinian subaerial erosion of the Proto-Nile delta. *Marine Geology*, 44, 253–272.
- Ben-Avraham Z., Tibor G., Limonov A.F. *et al.* 1995. Structure and tectonics of the eastern Cyprian Arc. *Marine and Petroleum Geology*, 12, 263–271.
- Bertoni C. & Cartwright J.A. 2007. Major erosion at the end of the Messinian Salinity Crisis : evidence from the Levant Basin, Eastern Mediterranean. *Basin Research*, 19, 1–18.
- Biggs J., Bergman E., Emmerson B. *et al.* 2006. Fault identification for buried strike-slip earthquakes using InSAR : The 1994 and 2004 Al Hoceima, Morocco earthquakes. *Geophys. J. Int.*, 166, 1347–1362.
- Booth-Rea G., Ranero C.R., Martinez-Martinez J.M. *et al.* 2007. Crustal types and tertiary tectonic evolution of the Alboran sea, western Mediterranean. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 8, Q10005.
- Bourgeois J., Mauffret A., Ammar A. *et al.* 1992. Multichannel seismic data imaging of inversion tectonics of the Alboran Ridge (western Mediterranean Sea). *Geo-Marine Letters*, 12, 117–122.
- Bufoŕn E., Bezzeghoud M. & Udías A y Pro C. 2004. Seismic sources in the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure and Applied Geophysics*, 161, 623–646.
- Cakir Z., Meghraoui M., Akdoglu A.M. *et al.* 2006. Surface deformation associated with the M 6.4 24 February 2004 Al Hoceima, Morocco, earthquake deduced from InSAR : implications for the active tectonics along North Africa. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96, 1–10.
- Campillo A.C., Maldonado A. & Mauffret A. 1992. Stratigraphic and tectonic evolution of the western Alboran Sea : Late Miocene to recent. *Geo-Marine Letters*, 12, 165–172.
- Chalouan A., Saji R., Michard A. *et al.* 1997. Neogene tectonic evolution of the southwestern Alboran Basin as inferred from seismic data off Morocco. *AAPG Bulletin*, 81, 1161–1184.
- Comas M.C., García-Dueñas V. & Jurado M.J. 1992. Neogene tectonic evolution of the Alboran Sea from MCS data. *Geo-Marine Letters*, 12, 157–164.
- Comas M.C., Dañobeitia J.J., Alvarez-Marrón J. *et al.* 1995. Crustal reflections and structure in the Alboran basin : preliminary results of the ESCI – Alboran survey. *Rev. Soc. Geol. Espana*, 8 (4), 75–88.
- Comas M.C., Dañobeitia J.J., Alvarez-Marrón J. *et al.* 1997. Crustal reflections and structure in the Alboran Basin : preliminary

- results of the ESCI-Alboran Survey. *Rev. Soc. Geol. Esp.*, 8, 76–88.
- Comas M.C., Platt J.P., Soto J.I. *et al.* 1999. The origin and tectonic history of the Alboran basin : insights from Leg 161 results. In : Zahn R, Comas M.C, Klaus A. (Eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 555–580.
- d’Acremont E., Gutscher M.A., Rabaute A. *et al.* 2014. High-resolution imagery of active faulting offshore Al Hoceima, Northern Morocco. *Tectonophysics*, 632, 160–166.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. *et al.* 1990. Current Plate motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425–478.
- Dercourt J., Zonenshain L.P., Ricou L.E. *et al.* 1986. Geological evolution of the tethys belt from the atlantic to the pamirs since the LIAS. *Tectonophysics*, 123, 241–315.
- Dewey J.F., Helman M.L., Knott S.D. *et al.* 1989. Kinematics of the western Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications*, 45, 265–283.
- Dillon W.P., Robb J.M., Greene H.G. *et al.* 1980. Evolution of the continental margin of southern Spain and the Alboran Sea. *Marine Geology*, 36, 205–226.
- Do Couto D., Gorini C., Jolivet L. *et al.* 2016. Tectonic and stratigraphic evolution of the Western Alboran Sea Basin in the last 25 Myrs. *Tectonophysics*, 677–678, 280–311.
- Duggen S., Hoernle K., van den Bogaard P. *et al.* 2004. Magmatic evolution of the Alboran region : The role of subduction in forming the western Mediterranean and causing the Messinian Salinity Crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 218, 91–108.
- Duggen S., Hoernle K., Klügel A. *et al.* 2008. Geochemical zonation of the Miocene Alborán Basin volcanism (westernmost Mediterranean) : geodynamic implications. *Contrib Mineral Petrol.*, 156, 577–593.
- Galdeano A., Courtillot V., Le Borgne E. *et al.* 1974. An aeromagnetic survey of the southwest of the Western Mediterranean : Description and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 23, 323–336.
- Genesseeux M. & Lefebvre D. 1980. Le Golfe du Lion et le Paléo-Rhône messinien. *Géologie Méditerranéenne*, 7, 71–80.
- Gorini, C. 1993. *Géodynamique d’une marge passive : le Golfe du Lion (Méditerranée Occidentale)*. Ph. D Thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 256 p.
- Gracia E., Pallas R., Soto J.I. *et al.* 2006. Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea) : implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 241, 734–749.
- Guennoc P., Gorini C. & Mauffret A. 2000. Histoire géologique du Golfe du Lion et cartographie du rift oligo-aquitainien et de la surface messinienne. *Géologie de la France*, 3, 67–97.
- Guillemin M. & Houzay J.P. 1982. Le Néogène post-nappes et le Quaternaire du Rif nord-oriental ; Stratigraphie et tectonique des bassins de Melilla, du Kert, de Boudinar et du piedmont des Kebbana. *Notes et mémoires du Service Géologique*, 314, 7–239.
- Hoernle K., van den Bogaard P. & Duggen S. 1999. Evidence for Miocene subduction beneath the Alboran Sea : 40Ar/39Ar dating and geochemistry of volcanic rocks from holes 977A and 978A. In : Zahn, R., Comas, M.C., Klaus, A. (Eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 161, 357–373.
- Iribarren L., Vergés J. & Fernández M. 2009. Sediment supply from the Betic–Rif orogen to basins through Neogene. *Tectonophysics*, 475, 68–84.
- Jurado M.J. & Comas M.C. 1992. Well log interpretation and seismic character of the Cenozoic sequence in the northern Alboran Sea. *Geo-Marine Letters*, 12, 129–136.
- Lafosse M., Gorini C., Le Roy P. *et al.* 2018. Late Pleistocene–Holocene history of a tectonically active segment of the continental margin (Nekor basin, Western Mediterranean, Morocco). *Marine and Petroleum Geology*, 97, 370–389.
- Lafosse M., D’Acremont E., Rabaute A. *et al.* 2020. Plio-Quaternary tectonic evolution of the southern margin of the Alboran Basin (Western Mediterranean). *Solid Earth*, 11, 741–765.
- Leblanc D. & Olivier P. 1984. Role of strike-slip faults in the Betic–Rifian orogeny. *Tectonophysics*, 101, 345–355.
- Lofi J., Déverchère J., Gaullier, V. *et al.* 2010. Atlas of the “Messinian Salinity Crisis” seismic markers in the Mediterranean and Black seas. *CCGM / Mémoires de la SGF*, 179, 72 p.
- Lofi J., Sage F., Déverchère J. *et al.* 2011. Refining our knowledge of the Messinian salinity crisis records in the offshore domain through multi-site seismic analysis. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 182, 163–180.
- Maillard A., Gorini C., Mauffret A. *et al.* 2006. Offshore evidence of polyphase erosion in the Valencia Basin (Northwestern Mediterranean) : Scenario for the Messinian Salinity Crisis. *Sedimentary Geology*, 188–189, 69–91.
- Martínez-García P., Comas M., Soto J.I. *et al.* 2013. Strike-slip tectonics and basin inversion in the Western Mediterranean : the Post-Messinian evolution of the Alboran Sea. *Basin Res.* 25, 1–27.
- Mauffret A., Montadert L., Lavergne M. *et al.* 1978. Geological and geophysical setting of DSDP Site 372 (Western Mediterranean). In : Montadert, L., Hsü, K.J. (Eds.). *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 42, 889–896.
- Mauffret A., Frizon de Lamotte D., Lallemand S. *et al.* 2004. E-W opening of the Algerian Basin (Western Mediterranean). *Terra Nova*, 16, 257–264.
- Mauffret A., Ammar A., Gorini C. *et al.* 2007. The Alboran Sea (Western Mediterranean) revisited with a view from the Moroccan Margin. *Terra Nova*, 19, 195–203.
- Medaouri M., Bracene R., Déverchère J. *et al.* 2012. Structural styles and Neogene petroleum system around the Yusuf-Habibas ridge (Alboran basin, Mediterranean sea). *Leading Edge*, 31, 776–785.
- Medaouri M., Jacques D., Graindorge D. *et al.* 2014. The transition from Alboran to Algerian basins (Western Mediterranean Sea) : Chronostratigraphy, deep crustal structure and tectonic evolution at the rear of a narrow slab rollback system. *Journal of Geodynamics*, 77, 186–205.
- Mulder C.J. & Parry G.R. 1977. *Late Tertiary evolution of the Alboran Sea at the eastern entrance of the straits of Gibraltar*. In : *International symposium on the structural history of the Mediterranean basins*, 401–410.
- Rehault J.P., Boillot G. & Mauffret A. 1984. The Western Mediterranean Basin geological evolution. *Marine Geology*, 55(3–4), 447–477.
- Romagney A., Münch P., Cornée J.J. *et al.* 2014. Late Miocene to present-day exhumation and uplift of the Internal Zone of the Rif Chain : Insights from low temperature thermochronometry and basin analysis. *J. Geodyn.*, 77, 39–55.
- Rosenbaum G., Liſter G.S. & Duboz C. 2002. Reconstruction of the tectonic evolution of the western Mediterranean since the Oligocene. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 107–126.
- Serpelloni E., Vannucci G., Pondrelli S. *et al.* 2007. Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169, 1180–1200.
- Soto J.I., Comas M.C. & de la Linde J. 1996. Espesor de sedimentos en la cuenca de Alborán mediante una conversión sísmica corregida. *Geogaceta*, 20, 382–285.

- Soto J.I., Fernández-Ibáñez F., Talukder A.R. *et al.* 2010. Miocene shale tectonics in the Alboran Sea (western Mediterranean). In : Wood, L., (Ed.), Shale tectonics. *AAPG Memoir*, 93, p.119–144.
- Spakman W. & Wortel R. 2004. A Tomographic View on Western Mediterranean Geodynamics, in : Cavazza W, Roure F, Spakman W, Stampfli G.M, Ziegler P.A. (Eds.), The TRANSMED Atlas. The Mediterranean Region from Crust to Mantle. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 31–52.
- Stich D., Ammon C.J. & Morales J. 2003. Momenttensor solution for small and moderate earth quakes in the Ibero-Maghreb region. *Journal of Geophysical Research*, 108, B3, 2148.
- Stich D., Serpelloni E., de Lis Mancilla F.D.L. *et al.* 2006. Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics*, 426,295–317.
- Urgeles R., Camerlenghi A. & Garcia-Castellanos D. 2011. New constraints on the Messinian sealevel drawdown from 3D seismic data of the Ebro Margin, western Mediterranean. *Basin Research*, 23, 123–145.
- Watts A.B., Piatt J.P. & Buhl P. 1993. Tectonic evolution of the Alboran Sea basin. *Basin Research* 5, 153–177.
- Willet, A. 1997. *Marine geophysical investigations of the Alboran Sea*, Doctoral thesis, Oxford University, Oxford.

Manuscrit reçu 18/02/2021
Version révisée acceptée le 15/07/2021
Version finale reçue le 17/07/2021
Mise en ligne le 18/07/2021