

# Quelques développements récents sur la géodynamique du Maghreb

## Some recent developments on the Maghreb geodynamics

### Avant-propos

L'Afrique est presque (90%) entièrement entourée de marges passives. La seule exception est le domaine méditerranéen, où la convergence active entre l'Afrique et l'Europe est accommodée, soit par subduction en Méditerranée orientale [56], soit, en Méditerranée occidentale, le long d'une limite de plaques complexe, où les failles inverses d'orientation ENE–WSW sont les structures dominantes [5,8,10,32,37].

Le long et au sud de cette frontière de plaques, le domaine orogénique maghrébin, d'âge Cénozoïque, comporte le Tell–Rif (« Maghrébides ») et les Atlas [11]. Le Tell–Rif est interprété classiquement comme une chaîne de type alpin, c'est-à-dire résultant de la fermeture de la Téthys maghrébine [6]; les Atlas, à l'inverse, sont compris comme des orogènes intracontinentaux [29].

Ce numéro thématique de *Comptes rendus Geoscience* nous donne l'occasion d'aborder à nouveau certains aspects de la géodynamique phanérozoïque du Maghreb, en insistant sur la période Cénozoïque.

### 1. L'héritage varisque et plus ancien

La croûte nord-africaine est fortement hétérogène [14]. Les parties occidentale et sud-occidentale des aires (sub-)sahariennes situées au sud du front Sud-Atlantique (Fig. 1), appartiennent au craton ouest-africain, qui affleure largement dans le bouclier Riguibat [54] et peut aussi être reconnu dans les boutonnières de l'Anti-Atlas [13]. Vers le nord et l'est, ces terrains, d'âges Archéen et Éburnéen (~2 Ga) sont bordés, et parfois repris, dans la chaîne panafricaine au néo-Protérozoïque

### Foreword

Africa is almost entirely (90%) surrounded by passive margins. The only exception is the Mediterranean region, where the ongoing convergence between Africa and Europe is accommodated either by subduction in Eastern Mediterranean [56] or, in Western Mediterranean, along a complex transcurrent plate boundary where ENE-trending active thrust faults are the predominant features [5,8,10,32,37].

Along and south of this plate boundary, the Cenozoic Maghrebian orogenic domain comprises the Tell–Rif ('Maghrebides') and the Atlas systems [11]. The Tell–Rif is classically interpreted as an Alpine-type orogen resulting from the closure of the Maghrebian Tethys [6], whereas the Atlas is regarded as an intra-continental orogen [29].

This thematic issue of *Comptes rendus Geoscience* gives us an opportunity to revisit some aspects of the Phanerozoic Maghrebian geodynamics, with emphasis on the Cenozoic-to-Present span of time.

### 1. The Variscan and older heritage

The North African crust is strongly heterogeneous [14]. The western and southernmost part of the (sub-)Sahara areas, south of the South Atlas Front (Fig. 1), belongs to the West African Craton (WAC), which crops out abundantly in the Reguibat shield [54], and can be locally recognized in the basement domes of the western Anti-Atlas [13]. To the north and the east, these Archean and Eburnian (~2 Ga) terranes are bounded by (and partly reworked in) the Neoproterozoic Panafrican

(~ 685–560 Ma). Celle-ci est largement affleurante dans l'Anti-Atlas et l'Ougarta. Elle constitue, selon toute vraisemblance, le socle des bassins sud-algérien et saharien et affleure à nouveau dans le Hoggar (Ahaggar). L'histoire de la chaîne panafricaine n'est pas abordée dans ce numéro thématique, qui débute simplement après la formation du néo-craton africain (Gondwanien).

Burkhard et al. [7] examinent comment cette croûte panafricaine a subi une subsidence pendant le Paléozoïque, au nord et à l'est de la dorsale Riguibat, avant d'être affectée partiellement par l'orogénèse varisque. Les bassins de Tindouf, de Béchar et de Reggane ne sont pas affectés par l'orogénèse varisque, alors que la croûte de l'Anti-Atlas et de l'Ougarta fut, au Carbonifère terminal, traversée par des failles inverses majeures enracinées profondément dans la croûte inférieure ductile. Ces discontinuités, néo-protérozoïques et paléozoïques, sont à l'origine de discontinuités mécaniques qui, plus tard, contrôleront l'évolution méso-cénozoïque le long et au sud du front Sud-Atlantique dans l'ensemble du Maghreb [20,22,40].

La croûte du domaine atlasique et mésétien est complètement différente, dans la mesure où elle fut profondément affectée par le mégacycle orogénique du Paléozoïque [22]. Le socle pré-Permien de ce domaine affleure seulement au Maghreb occidental, de l'Algérie nord-occidentale à la côte atlantique du Maroc. Celui-ci ne se compose que de roches paléozoïques, du Cambrien inférieur au Carbonifère, de telle sorte que la nature de la croûte profonde reste conjecturale. Les massifs paléozoïques les plus occidentaux montrent des déformations relevant du cycle calédonien (acadien), mais les structures majeures relèvent du cycle éovarisque et varisque (Alléghanien). Malheureusement, les relations de ce domaine crustal avec les domaines continentaux voisins restent l'objet de discussions importantes. Vers l'est et le nord, l'ouverture des océans Atlantique et Téthysien, puis la fermeture de la Téthys et l'ouverture de la Méditerranée (voir ci-dessous) obscurcissent les relations avec les chaînes Appalachiennes–Alléghanienne, d'une part, et Varisque–Hercynienne, d'autre part. Vers le sud, une discontinuité majeure préfigurant le front Sud-Atlantique existe, au moins depuis le Carbonifère inférieur, entre la croûte de la Meseta et de l'Atlas et celle de l'Anti-Atlas et du domaine saharien. Cependant, la question de savoir s'il s'agit d'une zone transformante intracontinentale [12,22,41], ou bien d'une suture cachée résultant de la fermeture de la Paléotéthys [7,48], reste ouverte. De nouvelles études paléomagnétiques du mouvement relatif de la Meseta par rapport à l'Afrique seraient nécessaires pour pouvoir

belt (~ 685–560 Ma), widely exposed in the Anti-Atlas and Ougarta areas. The Panafrican belt likely makes up the deep basement of the South Algeria Saharan basins, and is extensively exposed again in the Ahaggar (Hoggar) shield. The evolution of these Precambrian belts is not considered in this volume, which takes the story after the formation of the African (Gondwanian) neocraton.

Burkhard et al. [7] examine the way this Precambrian crust subsided during the Palaeozoic north and east of the Reguibat arch, before being partly affected by the Variscan event. The Tindouf, Reggane, and Bechar basins remained unaffected, whereas the Anti-Atlas and Ougarta basement was affected by major reverse faults deeply rooted in the weak lower crust during the Late Carboniferous. This is the origin, both Neoproterozoic and Late Palaeozoic, of the crustal mechanical discontinuities which later on controlled the Mesozoic–Cenozoic evolution along and south of the South Atlas Front in the whole Maghreb [20,22,40].

The crust of the Meseta-Atlas domain is completely distinct, as it was deeply involved in the Palaeozoic orogenic megacycle [22]. The pre-Permian basement of this domain only crops out in western Maghreb, from northwestern Algeria to the Morocco Atlantic coast, and virtually only exposes Palaeozoic rocks, from Lower Cambrian to Carboniferous, so that the age and nature of the deep crust is conjectural. The westernmost Palaeozoic massifs display some records of the Caledonian (Acadian) cycle, but the main tectonogenic imprints are relevant to the Eovariscan–Variscan (Alleghanian) cycle. Unfortunately, the relationships of this crustal domain with the neighbouring continental domains remain open to discussion. Towards the west and the north, the opening of the Atlantic and Tethys oceans, then the closure of the latter and opening of the Mediterranean (see below) greatly obscured the connections with the Appalachian–Alleghanian and Variscan–Hercynian belts, respectively. Towards the south, a major discontinuity prefiguring the South Atlas Front extended between the Meseta-Atlas crust and the Anti-Atlas-Sahara crust at least as early as the Carboniferous. However, was it an intracontinental transform zone [12, 22,41] or a cryptic suture resulting from the closure of a major Palaeotethys ocean [7,48]? Renewed palaeomagnetic studies of the Meseta–Africa relative displacements should be necessary to hopefully reach a decision. In any case, the Variscan structures heavily controlled those of the Atlas orogen and even the figure and behaviour of the African Mesozoic–Cenozoic margin, now included in the Rif–Tell orogen (see below).

choisir sereinement. En tous cas, les structures varisques contrôlent fortement celles de l'Atlas et aussi la géométrie et le comportement de la marge africaine méso-cénozoïque, actuellement incluse dans l'orogène tello-rifain (voir ci-dessous).

## 2. Le système atlasique : une chaîne de chevauchement–plissement active

L'Atlas s'étend au nord du domaine saharien et forme l'avant-pays du Tell–Rif (Fig. 1). Les différentes ceintures de chevauchement–plissement constituant ce système orogénique se développèrent sur d'anciens grabens, initiés pendant le *rifting* triasico-liasique. Ultérieurement, pendant l'inversion cénozoïque résultant de la convergence Europe–Afrique, les déformations compressives se localisèrent au sein de ces domaines à plus faible résistance mécanique. En accord avec les résultats obtenus par Teixell et al. [51] dans le Haut Atlas (Maroc) et par Arboleya et al. [1] dans le Moyen Atlas, Benaouali-Mebarek et al. [4] montrent que l'Atlas saharien central a subi, au cours du Cénozoïque, un raccourcissement horizontal d'à peu près 10 km. Cette valeur est significativement plus faible que les 36 km estimés par Beauchamp et al. [3] dans le Haut Atlas.

La chronologie de l'inversion de l'Atlas demeure un sujet de débat. Ce point a été souligné récemment par Piqué et al. [42], qui insistent sur le fait que l'âge de la tectonique reste mal contraint en Tunisie. La contribution de Khomsi et al. [25] va permettre de combler ce déficit de connaissances. Sur la base de données sismiques de haute résolution, les auteurs montrent que

## 2. The Atlas system: an intracontinental active fold-thrust belt

The Atlas extends, north of the Sahara domain, in the foreland of the Tell–Rif (Fig. 1). The various fold-thrust belts constituting this orogenic system developed on former Mesozoic grabens initiated during the Triassic–Liassic rifting. Subsequently, during the Cenozoic inversion resulting from the Africa–Eurasia convergence, the compressional deformation was localized along these weakened zones. In agreement with results obtained by Teixell et al. [51] for the High Atlas (Morocco) and Arboleya et al. [1] for the Middle Atlas, Benaouali-Mebarek et al. [4] show that the central Saharan Atlas (Algeria) accommodated during the Cenozoic a horizontal shortening of about 10 km. This value is significantly less than the 36 km estimated by Beauchamp et al. [3] in the High Atlas.

The timing of the Atlas inversion remains a matter of debate. This has been emphasised in a recent paper by Piqué et al. [42], according to which the age of compressive deformation was 'poorly defined' in Tunisia. The contribution of Khomsi et al. [25] allows us to fill in this gap. Based on high-resolution seismic data, the authors show that different compressive deformation pulses occurred in eastern Tunisia during the Uppermost Cretaceous and Palaeocene, with a paroxysm during the Middle–Upper Eocene (Atlas event). So, the authors demonstrate that this phase, known since a long time in Algeria [26], is general at the scale of all Maghreb. On the other hand, the authors show that, in the studied area, the Oligo-Miocene period is characterized by

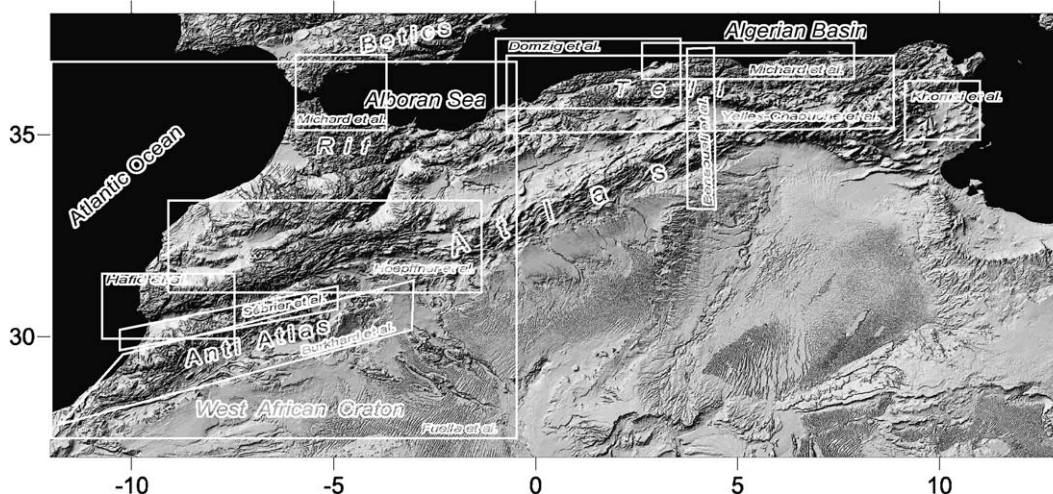


Fig. 1. Topographic map of the Maghreb, showing the areas concerned by the papers of the thematic issue.

Fig. 1. Carte topographique du Maghreb montrant les zones concernées par les articles du numéro thématique.

différentes déformations compressives eurent lieu en Tunisie orientale au cours du Crétacé terminal et du Paléocène, avec un paroxysme à l'Éocène moyen-supérieur (phase atlasique). Ainsi, les auteurs démontrent que cette phase, connue depuis longtemps en Algérie [26], est générale à l'échelle du Maghreb tout entier. Par ailleurs, les auteurs montrent que, dans leur domaine d'étude, la période oligo-miocène est caractérisée par le dépôt d'une épaisse série sédimentaire et le développement de failles normales.

Alors que, vers l'est, le système atlasique se connecte avec la plate-forme apulienne en traversant la Sicile; la question de sa terminaison occidentale, à l'endroit où elle bute à angle droit contre la marge atlantique, restait posée. Hafid et al. [21] illustrent le style particulier de cette zone, caractérisée par une tectonique de décollement au-dessus du sel triasique. Les auteurs montrent aussi que le massif paléozoïque des Jebilet, situé au nord de Marrakech, est chevauchant vers le nord sur la plaine de la Bahira et peut, à ce titre, être considéré comme faisant partie intégrante de la chaîne de plissement et chevauchement de l'Atlas.

Le système atlasique montre une activité sismique modérée, qui est principalement concentrée au Maroc, à l'extrémité occidentale de la chaîne. De manière plus précise, la distribution des épicesentres suit une direction générale NE–SW, parallèle au Moyen Atlas et aussi à la zone à lithosphère amincie cartographiée par Fullea et al. [18]. Posant la question de l'aléa sismique dans le Haut Atlas marocain, Sébrier et al. [47] démontrent l'existence d'une activité tectonique continue le long du front Sud-Atlasique durant tout le Quaternaire. Les auteurs montrent que les longueurs typiques des segments de failles actives sont d'à peu près 15 km. De telles longueurs les conduisent à estimer des magnitudes potentielles maximales ( $M_w$ ) entre 6,1 et 6,4. Sur chaque faille, la vitesse de glissement est de l'ordre de 0,1 mm an<sup>-1</sup>.

### 3. Le système tello-rifain ou Maghrébides : un orogène de subduction soulevé

Le Tell–Rif (ou Maghrébides) résulte de la fermeture de la Téthys occidentale et de l'ouverture concomitante des bassins algérien et d'Alboran [9,16,24,27,30,33,44,45,53]. Il comprend différentes zones tectono-stratigraphiques, qui sont, du nord au sud (voir la figure 1 de Domzig et al. [10]) :

- les zones internes, issues du domaine Alkapeca (Alboran–Kabyliens–Péloritain–Calabre) ou domai-

the deposition of a thick sedimentary sequence and the development of normal faults.

While to the east the Atlas system connects with the Apulian platform through Sicily, the question of its western termination as it intersects at right angle the Atlantic margin was pending. Hafid et al. [21] illustrate the particular style of this zone characterized by décollement tectonics over Triassic salt. The authors also show that the Jebilet Palaeozoic massif, situated north of Marrakech, is thrust northward over the Bahira plain and may therefore be considered as an integral part of the Atlas fold-and-thrust belt.

The Atlas system is characterized by a moderate seismic activity, which is mainly concentrated in its western Moroccan part. More precisely, the distribution of epicentres follows a NE–SW trend, parallel to the Middle Atlas and also to the zone of thinned lithosphere mapped by Fullea et al. [18]. Addressing the question of seismic hazard in the Moroccan High Atlas, Sébrier et al. [47] demonstrate a continuing Quaternary activity along the South Atlas Front. The authors show that the active segments have typical lengths of about 15 km. Such sizes allow them to estimate maximum potential magnitudes ( $M_w$ ) between 6.1 and 6.4. On each fault, the slip rate is in the order of 0.1 mm yr<sup>-1</sup>.

### 3. The Tell–Rif or Maghrebides system: an uplifted, subduction-related orogen

The Tell–Rif (= Maghrebides) orogenic system results from the closure of the western Tethys and the coeval opening of the Algerian basin [9,16,24,27,30,33,44,45,53]. It comprises different tectono-stratigraphic zones, which are, from north to south (see Fig. 1 in Domzig et al. [10]):

- the internal zones, issued from the Alkapeca (Alboran–Kabyliens–Péloritain–Calabria) or Mesomediterranean domain, a disrupted terrane of European or Adriatic affinities [6,34];
- the flyschs domain, which corresponds to the sedimentary cover of the former Tethys ocean;
- the external zones (Tell–Rif s.s.) corresponding to the inverted African palaeo-margin.

Currently, the internal zones are represented by different massifs scattered along the Mediterranean seashore. Due to the scarcity of available offshore data in the Algerian Basin, the origin of this segmentation is controversial. Presenting the preliminary results of the Maradja'2003 cruise along the western Algerian margin, Domzig et al. [10] detail the geometry of the

- ne méso-méditerranéen, représentant un terrain éclaté d'origine européenne ou adriatique [6,34] ;
- le domaine des flyschs, correspondant à la couverture sédimentaire de l'ancien océan Téthys ;
  - les zones externes (Tell–Rif s.s.), correspondant à la paléomarge inversée de l'Afrique.

À l'heure actuelle, les zones internes sont représentées par différents massifs, dispersés le long de la côte méditerranéenne. Du fait de la rareté des données marines disponibles dans le bassin algérien, l'origine de cette segmentation est discutée. Présentant les premiers résultats de la campagne à la mer Maradja'2003, effectuée le long de la marge algérienne occidentale, Domzig et al. [10] détaillent la géométrie de la frontière externe–interne et proposent une carte de la transition avec le domaine océanique néoformé. Les auteurs montrent que le domaine Alkapeca n'existe pas dans le bassin algérien le plus occidental et suggèrent une dispersion de celui-ci par l'intermédiaire de grandes failles décrochantes accompagnant la translation vers l'ouest du domaine d'Alboran (Rif et Bétique interne). D'un autre côté, les auteurs trouvent de bons arguments en faveur de plissements et chevauchements actifs réutilisant les limites des zones internes.

Michard et al. [34] réexaminent l'évolution métamorphique des zones internes du Rif, en prenant en compte les résultats de nouvelles études thermobarométriques et géochronologiques [23,38,39]. Ils définissent un ensemble supérieur peu affecté par l'orogénèse alpine (dorsale, Ghomarides) et un ensemble inférieur affecté par un métamorphisme alpin HP–BT, puis BP–HT. Ce dernier événement affecte aussi la base du complexe de nappes ghomaride et semble devoir être relié à l'initiation du *rifting* de la mer d'Alboran, vers 22–20 Ma. Les auteurs montrent qu'une évolution métamorphique comparable affecte également les Kabyliques algériennes (massifs de Chenoua, d'Alger, Kabyliques et Edough). Les zones internes du Tell et du Rif, de même que celles des cordillères Bétiques (arc de Gibraltar) et de Calabre proviennent de l'éclatement d'un même domaine orogénique pendant l'ouverture en bassins d'arrière-arc de la Méditerranée occidentale à l'arrière de la zone de subduction apennino-maghrébine [16,27,53]. Malgré tout, la question de savoir si cette subduction succède [9,13] ou non [15,24] à une subduction alpino-bétique de sens opposé reste ouverte à la discussion.

La contribution de Benaouali-Merabek et al. [4] insiste sur l'évolution post-Crétacé des systèmes tellien et atlasique en Algérie centrale et donne un modèle cinématique préliminaire en quatre étapes, pour expliquer l'évolution de cette partie de la paléomarge africaine.

boundary between the internal and external zones and propose a map of the transition with the newly formed oceanic domain. The authors show that the Alkapeca domain does not exist in the westernmost Algerian margin and suggest a scattering by large Miocene strike-slip faulting during the westward motion of the Alboran domain (internal Rif and Betics). Finally, the authors find strong evidence of active folding and reverse faulting reactivating the limits of the internal zones.

Michard et al. [34] revisit the metamorphic evolution of the Rif Internal Zones, taking advantage of new thermobarometric and geochronologic studies [23,38,39]. They define a mostly non-Alpine upper plate (Dorsale, Ghomarides), and a lower plate (Sebtides) affected by HP–LT, then HT–LP Alpine metamorphism. The latter event also affects the bottom of the Ghomaride complex and seems to be related to the onset of the Alboran Sea rifting at ~22–20 Ma. The authors also show that a similar metamorphic structure characterizes the Kabyliques (Chenoua, Algiers, Kabyliques, and Edough massifs) of Algeria. The Tell–Rif internal zones, together with those of the Betics (Gibraltar Arc) and Calabria, originate from the disruption of a single orogenic complex during the back-arc opening of the Mediterranean basins above the retreating Apennines–Maghreb subduction [16,27,53]. However, the question of whether the latter subduction followed an earlier, and opposite Alpine–Betic subduction [9,33] or not [15,24] remains open to discussion.

The contribution of Benaouali-Mebarek et al. [4] focuses on the post-Cretaceous evolution of the Tell and Atlas systems in central Algeria and give a preliminary four-step kinematic model for this part of the African palaeomargin. They subsequently integrate their results in a comprehensive geodynamic scenario emphasising the role of subduction. This process should be responsible for: (1) Middle–Late Eocene deformation (Atlas phase) in the foreland, (2) Lower Miocene flexuring of the African margin, (3) development of an accretionary prism along the front of the moving Kabyliques, and (4) late out-of-sequence thrusting due to docking of the Kabyliques with Africa. The Miocene emersion and uplift of the Tell system could be related to slab break-off and tearing of the lithosphere along the Algerian margin [49].

The Tell–Rif system currently experiences an important and occasionally destructive seismic activity. Yelles-Chaouche et al. [57] propose a reappraisal of the main active faults in northern Algeria. These faults mainly correspond to offshore or onshore northeast- to ENE-trending reverse faults developed at right angle to the current convergence between the Eurasian and Afri-

Les auteurs intègrent ensuite leur résultat dans un modèle conceptuel insistant sur le rôle de la subduction. Ce processus serait à l'origine : (1) de la phase atlasique d'âge Éocène moyen–supérieur dans l'avant-pays, (2) de la flexuration de la marge africaine au Miocène inférieur, (3) du développement d'un prisme d'accrétion au front des Kabyliques en mouvement et (4) du développement de chevauchements hors séquence à la suite de l'échouage des Kabyliques sur l'Afrique. L'émersion au Miocène et le soulèvement du système tellien pourraient être liés à la rupture et à la déchirure de la plaque subduite le long de la marge algérienne [49].

Le système tello-rifain est actuellement le siège d'une activité sismique importante, et parfois destructrice. Yelles-Chaouche et al. [57] proposent une réévaluation des principales failles actives en Algérie du Nord. Ces failles correspondent essentiellement à des failles inverses, marines et terrestres, d'orientation NE–SW à ENE–WSW, développées à 90° de la direction de convergence des plaques Afrique et Eurasie. Le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 produisit un important soulèvement de la côte (jusqu'à 0,50 m) montrant que le soulèvement du Tell est toujours actif. Cette observation ouvre la question plus générale de l'origine du relief du Maghreb.

#### 4. Origine de la topographie du Maghreb

La topographie du Maghreb était considérée, en général, comme la conséquence directe des processus tectoniques, c'est-à-dire du raccourcissement crustal, dans le contexte de la convergence entre les plaques Afrique et Europe [16,19]. Cependant, une telle explication ne permettait pas de rendre compte de deux faits importants :

- les régions les plus élevées sont situées dans l'Atlas, à l'intérieur de la plaque Afrique, et non dans le Tell–Rif, à proximité de la limite des plaques (Fig. 1);
- au sein des Atlas, le relief n'est pas homogène et le segment le plus élevé se trouve dans le Haut Atlas (Maroc), une région où la convergence est à présent plus lente qu'ailleurs dans le Maghreb.

Comparée à d'autres orogènes récents, la structure profonde crustale et lithosphérique du Maghreb est assez mal connue. Cependant, différents auteurs [2,28,36,43,50,55] ont souligné que la racine crustale sous le Haut Atlas n'était pas suffisante pour soutenir isostatiquement le relief, suggérant ainsi que le relief n'était sans doute pas exclusivement d'origine tectonique.

The Boumerdès earthquake of 21 May 2003 generated a significant co-seismic coastal uplift (up to 0.50 m) showing that the rising of the Tell is still active. This observation opens the more general issue of the origin of Maghreb topography.

#### 4. Origin of Maghreb topography

The Maghreb topography was considered, in general, as directly linked to tectonic processes (crustal shortening) in the diffuse convergent domain between Africa and Europe [16,19]. However, such an explanation did not account for two lines of evidence:

- the most elevated regions are situated in the Atlas (within the African plate) and not at the plate boundary in the Tell–Rif system (Fig. 1);
- in the Atlas, the elevation is not cylindrical and the most elevated segment is in the High Atlas (Morocco), a region where convergence is presently slower than elsewhere in the Maghreb.

Compared to other recent orogens, the deep, i.e. crustal and lithospheric, structure of the Maghreb is relatively poorly known. However, various authors [2,28,36,43,50,55] have pointed out that the crustal root beneath the Atlas of Morocco is not thick enough to isostatically support the topography, suggesting that its relief is not of tectonic origin exclusively. The existence of a thin and hot lithosphere beneath the High Atlas, contributing to the relief by thermal doming, has been suggested by Seber et al. [46], based on teleseismic P-wave travel-time tomography. Accordingly, various lithospheric cross-sections based on a same joint inversion method (using topography, geoid, gravity and heat flow) fully described in Zeyen and Fernandez [58], show the existence of a thin lithosphere (about 70 km) beneath some segments of the High and Middle Atlas [17,35,52,59].

The first 3D view of this zone of thinned lithosphere beneath the Atlas is given by Fullea et al. [18], based on a new inversion method of geoid and topography anomalies. In complement, the authors give a map of Moho depth showing that the whole of Morocco is underlain by a 30–35-km-thick continental crust reaching a maximum of 39 km beneath the central High Atlas. At the scale of Morocco, Fullea et al. [18] show that the thinned lithosphere zone is not restricted to the Atlas system, but forms a large NE–SW ellipse crossing the main structural boundaries (the Tell–Rif and Atlas Fronts in particular). The topography of Morocco therefore reflects the combined effect of tectonic shortening

L'existence d'une lithosphère peu épaisse et chaude sous le Haut Atlas, contribuant au relief par bombement thermique, a été suggérée par Seber et al. [46] sur la base de la tomographie du temps d'arrivée des ondes P de télé-séismes. En bon accord avec ces résultats, différentes coupes d'échelle lithosphérique, construites en utilisant la même méthode d'inversion (qui utilise la topographie, le géoïde, la gravimétrie et le flux de chaleur) décrite par Zeyen et Fernandez [58], montrent l'existence d'une lithosphère amincie (à peu près 70 km d'épaisseur) sous certaines parties du Haut et du Moyen Atlas [17,35,52,59].

La première vue en 3D de cette zone à lithosphère amincie sous l'Atlas est donnée par Fullea et al. [18], grâce à une nouvelle méthode utilisant les anomalies du géoïde et de la topographie. De plus, les auteurs fournissent une carte de la profondeur du Moho, montrant que l'ensemble du Maroc est caractérisé par une croûte continentale d'épaisseur 30–35 km, atteignant un maximum de 39 km sous le Haut Atlas central. À l'échelle du Maroc, Fullea et al. [18] montrent que la zone à lithosphère amincie n'est pas restreinte au système atlasique, mais dessine une grande ellipse, de grand axe NE–SW, recoupant les principales frontières tectoniques et, en particulier, les fronts du Rif et de l'Atlas. Ainsi, la topographie du Maroc traduit les effets combinés du raccourcissement tectonique et d'un dôme thermique, là où celui-ci existe. En accord avec Missenard et al. [35], nous insistons sur le fait que la région la plus élevée (4200 m au Jebel Toubkal) est située dans le Haut Atlas central, là où le dôme thermique d'orientation NE–SW croise la chaîne atlasique, d'orientation ENE–WSW.

En Algérie, l'unique coupe lithosphérique disponible [45] ne montre pas d'amincissement lithosphérique sous l'Atlas. Il est donc vraisemblable que le relief de l'Algérie du Nord, toujours inférieur à 2500 m, soit principalement d'origine tectonique. La chronologie des événements et de la construction de la chaîne est bien connue dans cette région. Elle comporte deux événements compressifs principaux, d'âges Éocène terminal et Pléistocène [16,26]. Comme nous l'avons vu précédemment, cette chronologie peut être étendue à l'ensemble du domaine atlasique, depuis l'Atlas Tunisien le plus oriental [25] jusqu'au Haut Atlas occidental [21]. Au Maroc, néanmoins, le signal topographique est plus complexe à interpréter, en raison de sa double origine, à la fois thermique et tectonique. Selon Missenard et al. [35], le dôme thermique daterait du Miocène moyen, c'est-à-dire entre les deux événements compressifs, comme semble le confirmer l'âge du volcanisme alcalin associé.

and thermal doming where it exists. In line with Missenard et al. [35], we emphasise that the most elevated region (4200 m at Jebel Toubkal) is situated in the central High Atlas, where the NE–SW thermal dome crosses the ENE–WSW intra-continental Atlas chain.

In Algeria, the only available lithospheric cross-section [45] does not show evidence of lithospheric thinning beneath the Atlas. Thus it is likely that the Algerian relief (everywhere beneath 2500 m) is mostly of tectonic origin. The tectonic agenda and coeval relief building of the Atlas is well known in this region. It comprises two main phases of Late Eocene and Pleistocene ages, respectively [16,26]. As we have seen above, this timing can be extended to the whole Atlas from the easternmost Tunisian Atlas [25] to the westernmost Moroccan Atlas [21]. However, in Morocco, the topography is more complex to interpret due to its twofold, tectonic and thermal, origin. According to Missenard et al. [35], it is suggested that the thermal doming developed in Middle Miocene times, in between the two tectonic events, as it seems to be confirmed by the age of the associated alkaline volcanism.

The uplift of the Tell–Rif and the resulting relief are linked to a completely different process. The Tell–Rif is a subduction-related orogen developed above the subducting western Tethyan Ocean [4,34]. The uplift, which led to its present emerged position, has been interpreted as a response to the slab break-off (slab detachment and slab tearing) that occurred firstly below the Kabylides then propagated eastward toward Sicily and westward toward the Rif and Gibraltar [49]. Good evidence for such a scenario is given not only by the age and position of the 'post collisional' calc-alkaline volcanic rocks [31], but also by the age of the youngest marine sediments deposited on the prism in the so-called 'post-*nappe*' basins. Close to the Algeria–Morocco border, the Tell–Rif front shows a marked reentrant, which could be associated with a localized uplift of the foreland, in relation with the thermal doming discussed above.

To summarise, the lithosphere of the Maghreb has undergone a recent and complex evolution with interaction between subduction, asthenospheric thermal doming and far stress-field induced deformation. So it certainly provides an outstanding natural laboratory to study the four-dimensional topographic evolution of the Earth.

Le soulèvement du Tell–Rif et le relief résultant sont liés à un processus totalement différent. Le Tell–Rif est un orogène de subduction développé au-dessus de la zone de subduction de l’océan Téthysien occidental [4,34]. Le soulèvement, responsable de sa position émergée actuelle, a été interprété comme une réponse à la rupture du panneau plongeant qui se produisit d’abord sous les Kabylies, puis se propagea par déchirure vers l’est, en direction de la Sicile, et vers l’ouest, en direction de Gibraltar [49]. De bons arguments en faveur d’un tel scénario sont fournis, non seulement par l’âge et la position du volcanisme calco-alcalin post-collision [31], mais aussi par celui des sédiments marins les plus jeunes déposés au toit du prisme, dans les bassins dits « post-nappes ». À proximité de la frontière algéro-marocaine, le front du Tell–Rif dessine un réentrant marqué, qui pourrait être lié à un soulèvement local de l’avant-pays résultant du dôme thermique discuté précédemment.

Pour résumer, la lithosphère du Maghreb a enregistré une évolution récente complexe, dans laquelle interagissent subduction, bombement thermique asthénosphérique et déformation en champ lointain. Ainsi, cette région fournit un laboratoire naturel exceptionnel pour étudier l’évolution topographique en quatre dimensions de la surface de la Terre.

**Dominique Frizon de Lamotte**

*Département des sciences de la Terre et de l’environnement (CNRS UMR 7072), université de Cergy-Pontoise, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise cedex, France*  
*Adresse e-mail : dfrizon@geol.u-cergy.fr*

**André Michard**

*Laboratoire de géologie, École normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris cedex 05, France*

**Omar Saddiqi**

*Laboratoire de géodynamique et thermochronologie, faculté des sciences Aïn Chock, BP 5366, Casablanca Maarif, Maroc*

Disponible sur Internet le 20 décembre 2005

**Références**

- [1] M.L. Arboleya, M. Charroud, A. Teixell, M. Julivert, A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco, *J. Afr. Earth Sci.* 39 (2004) 319–327.
- [2] P. Ayarza, F. Alvarez-Lobato, A. Teixell, M.L. Arboleya, E. Teson, M. Julivert, M. Charroud, Crustal structure under the central High Atlas Mountains (Morocco) from geological and gravity data, *Tectonophysics* 400 (2005) 67–84.
- [3] W. Beauchamp, R.W. Allmendinger, M. Baranzagi, A. Demnati, M. El Alji, M. Dahmani, Inversion tectonics and the evolution of the High Atlas Mountains, Morocco, based on a geological-geophysical transect, *Tectonics* 18 (1999) 163–185.
- [4] N. Benaouali-Mebarek, D. Frizon de Lamotte, R. Bracène, E. Roca, W. Sassi, F. Roure, Post-Cretaceous kinematics of the



- Atlas and Tell systems in central Algeria: Early foreland folding and subduction-related deformation, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [5] A. Boudiaf, H. Philip, A. Coutelle, J.-F. Ritz, Découverte d'un chevauchement d'âge Quaternaire au sud de la Grande Kabylie (Algérie), *Geodin. Acta* 12 (1999) 71–80.
- [6] J.-P. Bouillin, Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes, *Bull. Soc. géol. France* 8 (4) (1986) 547–558.
- [7] M. Burkhard, S. Caritg, U. Helg, C. Robert-Charrue, A. Sulaimani, Tectonics of the Anti-Atlas of Morocco, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [8] J. Déverchère, K. Yelles, A. Domzig, B. Mercier de Lépinay, J.-P. Bouillin, V. Gaullier, R. Bracène, E. Calais, B. Savoye, A. Kherroubi, P. Le Roy, H. Pauc, G. Dan, Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 *M<sub>w</sub>* 6.9 earthquake, *Geophys. Res. Lett.* 32 (2005) L04311, doi:10.1029/2004GL021646.
- [9] C. Doglioni, M. Fernandez, E. Gueguen, F. Sabat, On the interference between the early Apennines–Maghrebides back-arc extension and the Alps-Betics orogen in the Neogene geodynamics of the Western Mediterranean, *Bull. Soc. Geol. Ital.* 118 (1999) 75–89.
- [10] A. Domzig, C. Le Roy, J. Déverchère, K. Yelles, J.-P. Bouillin, R. Bracène, B. Mercier de Lépinay, P. Le Roy, E. Calais, A. Kherroubi, V. Gaullier, B. Savoye, H. Pauc, Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (MARADJA'03 cruise), *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [11] M. Durand-Delga, J.-M. Fonboté, Le cadre structural de la Méditerranée occidentale, in: J. Aubouin, J. Debelmas, M. Latreille (Eds.), *Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys*, Colloque n° 5, 26<sup>e</sup> Congrès géologique international, Paris, Mém. BRGM 115 (1980) 67–85.
- [12] A. El Hassani, A. Tahiri, O.H. Walliser, The Variscan crust between Gondwana and Baltica, *Cour. Forsch.-Inst. Senckenb.* 242 (2003) 81–87.
- [13] N. Ennih, J.-P. Liégeois, The Moroccan Anti-Atlas: the West African craton passive margin with limited Pan-African activity. Implications for the northern limit of the craton, *Precamb. Res.* 112 (2001) 289–302.
- [14] J. Fabre, Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines, SNED, Alger, 1976, 422 p., 1 folded map/1 carte pliée.
- [15] C. Faccenna, C. Piromallo, A. Crespo-Blanc, L. Jolivet, F. Rossetti, Lateral slab deformation and the origin of the Mediterranean arcs, *Tectonics* 23 (2004) TC001488, doi:10.1029/2002TC001488.
- [16] D. Frizon de Lamotte, B. Saint Bézar, R. Bracène, E. Mercier, The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean, *Tectonics* 19 (2000) 740–761.
- [17] D. Frizon de Lamotte, A. Crespo-Blanc, B. Saint Bézar, M. Comas, M. Fernández, H. Zeyen, P. Ayarza, C. Robert-Charrue, A. Chalouan, M. Zizi, A. Teixell, M.L. Arbolea, F. Alvarez-Lobato, M. Julivert, A. Michard, TRANSMED-transsect I, in: W. Cavazza, F.M. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds.), *The Transmed Atlas – The Mediterranean Region from crust to mantle*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [18] J. Fulla, M. Fernández, H. Zeyen, Lithospheric structure in the Atlantic–Mediterranean transition zone (southern Spain, northern Morocco): a simple approach from regional elevation and geoid data, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [19] F. Gómez, M. Barazangi, W. Beauchamp, Role of the Atlas Mountains (northwest Africa) within the African–Eurasian plate-boundary zone, *Geology* 28 (2000) 769–864.
- [20] H. Haddoum, R. Guiraud, A. Moussine-Pouchkine, Hercynian compressional deformations of the Ahnet-Mouydir Basin, Algerian Saharan Platform: far-field stress effects of the Late Paleozoic orogeny, *Terra Nova* 13 (2001) 220–226.
- [21] M. Hafid, M. Zizi, A.W. Bally, A. Aït Salem, Structural styles of the western onshore and offshore termination of the High Atlas, Morocco, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [22] C. Hoepffner, M.R. Houari, M. Bouabdelli, Tectonics of the North African Variscides (Morocco, Western Algeria), *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [23] E. Janots, F. Negro, F. Brunet, B. Goffé, M. Engi, M.L. Bouybaouene, Evolution of the REE mineralogy in HP-LT metapelites of the Sebti complex, Rif, Morocco: monazite stability and geochronology, *Lithos* (in press).
- [24] L. Jolivet, C. Faccenna, Mediterranean extension and the Africa–Eurasia collision, *Tectonics* 19 (2000) 1095–1106.
- [25] S. Khomsi, M. Bédir, M. Soussi, M.G. Ben Jemia, K. Latrache-Ben Ismail, Mise en évidence en sub-surface d'événements compressifs Éocène moyen-supérieur en Tunisie orientale (Sahel) : généralité de la phase atlasique en Afrique du Nord, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [26] R. Laffitte, Étude géologique de l'Aurès, *Publ. Serv. Carte géol. Algérie*, nouv. sér. 46 (1939) t. I 217 p. and t. II 281 p.
- [27] L. Lonergan, N. White, Origin of the Betic–Rif mountain belt, *Tectonics* 16 (1997) 504–522.
- [28] J. Makris, A. Demnati, J. Klussmann, Deep seismic soundings in Morocco and a crust and upper mantle model deduced from seismic and gravity data, *Ann. Geophys.* 3 (1985) 369–380.
- [29] M. Mattauer, P. Tapponnier, F. Proust, Sur les mécanismes de formation des chaînes intracontinentales : l'exemple des chaînes atlasiques du Maroc, *Bull. Soc. géol. France* 19 (1977) 521–526.
- [30] A. Mauffret, D. Frizon de Lamotte, S. Lallemand, C. Gorini, A. Maillard, East–west opening of the Algerian Basin (Western Mediterranean), *Terra Nova* 16 (2004) 257–264.
- [31] R. Maury, S. Fourcade, C. Coulon, M. Azzouzi, H. Bellon, A. Coutelle, A. Ouabadi, B. Semroud, M. Megarsi, J. Cotten, O. Belanteur, A. Louni-Hacini, A. Piqué, R. Capdevila, J. Hernandez, J.P. Rehault, Post-collisional Neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin: a consequence of slab breakoff, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 331 (2000) 159–173.
- [32] M. Meghraoui, J.-L. Morel, J. Andrieux, M. Dahmani, Tectonique plio-quaternaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran. Une zone complexe de convergence continent–continent, *Bull. Soc. géol. France* 167 (1996) 141–157.
- [33] A. Michard, A. Chalouan, H. Feinberg, B. Goffé, R. Montigny, How does the Alpine belt end between Spain and Morocco?, *Bull. Soc. géol. France* 173 (2002) 3–15.
- [34] A. Michard, F. Negro, O. Saddiqi, M.-L. Bouybaouene, A. Chalouan, R. Montigny, B. Goffé, Pressure-temperature-time constraints on the Maghrebides mountain building: evidence from the Rif transect (Morocco), Kabylia correlations (Algeria) and geodynamic implications, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [35] Y. Missenard, H. Zeyen, D. Frizon de Lamotte, P. Leturmy, C. Petit, M. Sébrier, O. Saddiqi, Crustal versus asthenospheric origin of the relief of the Atlas Mountains of Morocco, *J. Geophys. Res.* (in press).
- [36] K. Mickus, C. Jallouli, Crustal structure beneath the Tell and Atlas Mountains (Algeria and Tunisia) through the analysis of gravity data, *Tectonophysics* 314 (1999) 373–385.

- [37] J.-L. Morel, M. Meghraoui, Gorringer-Alboran-Tell tectonic zone: A transpression system along the Africa–Eurasia plate boundary, *Geology* 24 (1996) 755–758.
- [38] F. Negro, Exhumation des roches métamorphiques du domaine d'Alboran : étude de la chaîne rifaine (Maroc) et corrélation avec les Cordillères bétiques (Espagne), thèse, université Paris-11, Orsay, 2005, 250 p.
- [39] F. Negro, O. Beyssac, B. Goffé, O. Saddiqi, M.-L. Bouybaouene, Thermal structure and late metamorphic evolution of the Alboran Domain units in the Rif (Northern Morocco) and in Western Betics (Southern Spain), Constraints from Raman spectroscopy of carbonaceous material, *Earth Planet. Sci. Lett.* (submitted).
- [40] A. Piqué, *Geology of Northwest Africa*, Borntraeger, Berlin, 2001, 310 p.
- [41] A. Piqué, A. Michard, Moroccan Hercynides, a synopsis, *Am. J. Sci.* 289 (1989) 286–330.
- [42] A. Piqué, P. Tricart, R. Guiraud, E. Laville, S. Bouaziz, M. Amrhar, R. Aït Ouali, The Mesozoic-Cenozoic Atlas belt (North Africa): an overview, *Geodyn. Acta* 15 (2002) 185–208.
- [43] M. Ramdani, Geodynamic implications of intermediate-depth earthquakes and volcanism in the intraplate Atlas Mountains (Morocco), *Phys. Earth Planet. Inter.* 108 (1998) 245–260.
- [44] J.-P. Rehault, G. Boillot, A. Mauffret, The western Mediterranean basin geological evolution, *Mar. Geol.* 55 (1984) 447–477.
- [45] E. Roca, D. Frizon de Lamotte, A. Mauffret, R. Bracène, J. Vergés, N. Benaouali, M. Fernandez, J.A. Munoz, H. Zeyen, TRANSMED Transect II, in: W. Cavazza, F.M. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds.), *The Transmed Atlas – The Mediterranean Region from crust to mantle*, Springer, Berlin, 2004.
- [46] D. Seber, M. Barazangi, B. Tadili, M. Ramdani, A. Ibenbrahim, D. Ben Sari, Three-dimensional upper mantle structure beneath the intraplate Atlas and interplate Rif Mountains of Morocco, *J. Geophys. Res.* 101 (1996) 3125–3138.
- [47] M. Sébrier, L. Siame, M. Zouine, T. Winter, P. Leturmy, Y. Misenerard, Active tectonics in the Moroccan High Atlas, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [48] G.M. Stampfli, G.D. Borel, A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons, *Earth Planet. Sci. Lett.* 196 (2002) 17–33.
- [49] W. Spakman, M.J.R. Wortel, A tomographic view on western Mediterranean Geodynamics, in: W. Cavazza, F.M. Roure, W. Spakman, G.M. Stampfli, P.A. Ziegler (Eds.), *The Transmed Atlas – The Mediterranean Region from Crust to Mantle*, Springer, Berlin, 2004, pp. 31–52.
- [50] B. Tadili, M. Ramdani, D. Ben Sari, K. Chapochnikov, A. Bellot, Structure de la croûte dans le Nord du Maroc, *Ann. Géophys.* 4 (1986) 99–104.
- [51] A. Teixell, M.L. Arbolea, Julivert, M. Charroud, Tectonic shortening and topography in the central High Atlas, *Tectonics* 22 (2003) 1051, doi:10.1029/2002TC001460.
- [52] A. Teixell, P. Ayarza, H. Zeyen, M. Fernandez, M.-L. Arbolea, Effects of mantle upwelling in a compressional setting: the Atlas Mountains of Morocco, *Terra* (2005) 456–461.
- [53] J. Vergés, F. Sabat, Constraints on the western Mediterranean kinematics evolution along a 1000-km transect from Iberia to Africa, in: B. Durand, L. Jolivet, F. Horvath, M. Séranne (Eds.), *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen*, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 156 (1999) 63–80.
- [54] M. Villeneuve, J.-J. Cornée, Structure, evolution and palaeogeography of the West African craton and bordering belts during the Neoproterozoic, *Precamb. Res.* 69 (1994) 307–326.
- [55] P. Wigger, G. Asch, P. Giese, W.-D. Heinsohn, S.O. El Alami, F. Ramdani, Crustal structure along a traverse across the Middle and High Atlas mountains derived from seismic refraction studies, *Geol. Rundsch.* 81 (1992) 234–248.
- [56] M.J.R. Wortel, S.D.B. Goes, W. Spakman, Structure and seismicity of the Aegean subduction zone, *Terra Nova* 2 (1990) 554–562.
- [57] A. Yelles-Chaouche, A. Boudiaf, H. Djellit, R. Bracene, La tectonique active de la région nord algérienne, *C. R. Geoscience* 338 (2006).
- [58] H. Zeyen, M. Fernández, Integrated lithospheric modeling combining thermal, gravity, and local isostasy analysis: application to the NE Spanish Geotransect, *J. Geophys. Res.* 99 (1994) 18089–18102.
- [59] H. Zeyen, P. Ayarza, M. Fernández, A. Rimi, Lithospheric structure under the western African-European plate boundary: A transect across the Atlas Mountains and the Gulf of Cadiz, *Tectonics* 24 (2005) TC2001, doi:10.1029/2004TC001639.