Contribution à l'inventaire du patrimoine géologique du Maroc : Les géosites du métamorphisme des Sebtides le long de la côte des Ghomara (Rif interne, NO Maroc)

Contribution to the inventory of the geological heritage of Morocco : The geosites of the Sebtides metamorphism along the Ghomara coast (internal Rif, NW Morocco)

Ali Aoulad Sidi Mhend^{1*}, Bouamama Cherai², Ali Maaté³, Rachid Hlila³, Isma Amri³, Said Chakiri⁴ & Soufian Maaté⁵

1. Geo-Biodiversity and Natural Patrimony Laboratory (GeoBio), Geophysics, Natural Patrimony Research Center (GEOPAC), Institut Scientifique, Mohammed V University in Rabat, Maroc *(ali.aouladsidimhend@is.um5.ac.ma).

2. Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation Tanger-Tétouan-Al Hoceima, équipe de recherche : Environnement, Education et Enseignement-Apprentissage des Sciences et Technologie, Maroc.

3. Laboratoire de Géologie de l'Environnement et Ressources Naturelles, FS, Abdelmalek Essaadi University, Tetouan, Morocco.

4. Laboratoire des Géosciences, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kénitra, Maroc.

5. L aboratoire de Géologie Appliquée, Département de Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques, Université Moulay Ismail, Errachidia, Maroc.

Résumé. Nous proposons et décrivons dans ce travail, dix géosites inventoriés dans les terrains métamorphiques des Sebtides de la côte des Ghomara (NW du Maroc). Ces géosites, regroupés dans un itinéraire (géoroute) à vocation pédagogique, sont caractérisés par une richesse notable en termes de structures, d'indices et de phénomènes géologiques originaux et faciles à repérer sur le terrain et à mettre en évidence. Dans cet itinéraire thématique qui met en évidence la grande diversité géologique de la côte des Ghomara, il est possible d'observer différents faciès et domaines métamorphiques. L'évaluation quantitative des géosites répertoriés, fondée sur une méthodologie proposée par Brilha (2016) et développée par Aoulad Sidi Mhend *et al.* (2019, 2020) révèle des scores plus ou moins importants pour ce qui est de leur valeur scientifique, le potentiel d'utilisation pédagogique, le risque de dégradation, et surtout le potentiel d'usage éducative.

De par sa richesse et son potentiel en données et processus géologiques souvent originaux et exceptionnels, la côte des Ghomara est une zone adéquate alors pour l'enseignement des sciences de la terre en général et plus particulièrement les notions du métamorphisme et sa relation avec la formation des chaînes de montagnes. Les géosites décrits dans cet article devraient donc être conservés, valorisés et exploités de manière rationnelle au service du développement durable de la côte des Ghomara en particulier et de la région Tanger-Tétouan-Al Hoceima en général.

Mots-clés : Inventaire, métamorphisme, géosite, évaluation quantitative, géoroute, Côtes des Ghomara.

Abstract. We propose and describe in this work, a set of geosites along the Ghomara coast that we have integrated into a georoute. This thematic itinerary, composed of ten geosites, is characterized by a notable richness in structures, indices and original geological phenomena and easy to locate in the field and to identify, that it could be considered as a sector with pedagogical vocation, in addition to the fact that it highlights the great geological diversity of the Ghomara coast. It is a perfect area for teaching earth sciences, especially metamorphism and its relationship with the formation of mountain chains. In this area, it is possible to observe different facies and metamorphic domains. In addition to the more or less other important values, determined for these different geosites (scientific value, educational and touristic use potential, and risk of degradation) by proceeding through a quantitative evaluation based on a methodology proposed by Brilha (2016) and developed by Aoulad Sidi Mhend *et al.* (2019, 2020), the value of educational use potential remains the most notable. These geosites should be conserved, valued, and rationally exploited for the sustainable development in the Ghomara coast in particular and in the entire region in general.

Keywords: Inventory, metamorphism, geosite, quantitative assessment, georoad, Ghomara Coast.

Abridged English version

Introduction

The present contribution reveals the objectives of promoting the teaching/learning of geology, and more specifically metamorphism, which is the main theme of this work. In this context, we propose 10 geosites defined on the basis of scientific value and potential for educational use (Brilha 2016) and which could be integrated into a geotrail for educational purposes.

Methodology and geological context

The Ghomara coast is a key sector for understanding metamorphism and associated phenomena. It forms part of the internal domain of the Rifian Chain. According to their metamorphic degree, these terranes belong (Fig. 1) to: i) Lower Sebtides units composed of micaschists, gneiss and kinzigites which form an aureole of metamorphism and surround the Beni Bousera peridotites and ii) Upper Sebtides or Federico units consisting of schists and metapelitic rocks slightly affected by alpine metamorphism.

For the qualitative description of these geosites, we proceeded by filling inventory sheets (Aoulad Sidi Mhend *et al.* 2019, 2020), but for the quantification of geosites, we calculated the following values: i) Scientific Value (SV), which is based on the following seven criteria: Integrity (Int), Representativeness (Rep), Rarity (Rar), Key Locality (KL), Scientific Knowledge (Sk), Geological Diversity (GD), and Use Restrictions (UR). ii) Educational Use Potential (EUP)

value is based on twelve criteria which are: Vulnerability (Vul), Accessibility (Acc), Use Restriction (UR), Safety (Sec), Logistics (Log), Population Density (PD), Association with Other Values (AV), Landscape (Pay), Uniqueness (Uni), Observation Conditions (OC), Educational Potential (EP), and Geologic Diversity (GD). iii) Risk of Degradation (RD), which is made up of five criteria: Deterioration of Geological Features (DGF), Proximity to Areas/Activities with potential to cause Degradation (PAD), Legal Protection (LP), Accessibility (Acc) and Population Density (PD).

The values of the geosites were calculated by summing their weighted criteria. This quantification is done by assigning scores 1, 2, 3, and 4 (low, medium, high, and very high respectively) for each criterion. Values of scientific and educational geosites inventoried here were calculated by the sum of its weighted criteria (Brilha 2016, Aoulad Sidi Mhend *et al.* 2019 and 2020).

Description of sites of geological interest

The sites proposed in our project to promote teachinglearning of metamorphism and its relationship with formation of the mountain chains, are presented below, according to their position on the road N 16 from Oued Laou to Sidi Yahya Aarab localities (Fig. 1).

- Geosite 1: Schists and quartzites of Permian-Triassic age of the Tizgarine Unit; these rocks from the top of the Federico units (Fig. 2) consist of shales and sandstones with red conglomerate layers and white, pinkish and greenish quartzites of Permian-Triassic age, having undergone a LP-LT metamorphism.

- Geosite 2: Sebtide/Ghomaride contact; this site offering the possibility to observe the Sebtide-Ghomaride contact is considered among the few sites, where it's possible to observe and examine the nature of the contact between these two main units of the internal domain. It is located on the N16 road that connects Kaa-Asras to Targha localities. It allows the observation of the tectonic superposition of Silurian shales with alternated conglomerate, which are affected by Hercynian metamorphism (Fig. 3), characterizing the nappe of Akaïli (the lower Ghomarides Unit) on the micaschists of Filali under amphibolite facies (development of staurolite±garnet) (Fig. 3A) forming the upper part of the lower Sebtides nappes stack (Fig. 3B).

- Geosite 3: Micaschists of Targha; it is a site of petrological interest, where micaschists appear in the form of a laminated metamorphic rock of gray-blackish color, belonging to the Sidi Ahmed el Filali metamorphic Unit (Fig. 4). The site corresponds to schist showing alternations of clear sandstone beds characterized by the presence of mineral association with muscovite, garnet, staurolite and beds of pelitic origin rich in carbonaceous matter (graphite shale).

- Geosite 4: Gneiss of Stehat; it presents very educational metamorphic processes by presenting a diffuse foliation (Fig. 5). The gneiss presents a laminated appearance, due to the arrangement and alternation of mica rich dark levels (melanosome) and rich quartz-feldspar clear levels (leucosome).

- Geosite 5: Kinzigite of Chmaâla; in our opinion, this is the only site in Morocco, where kinzigite outcrops with spectacular freshness. The formation process is closely related to the placement of the peridotite of Beni Bouzera (Fig. 6). The metamorphic conditions (pressure and temperature) of these rocks are estimated at 13-9 kbar and 850-800 °C, followed by cooling (750-650 °C) and decompression (5-4 kbar) (Romagny, 2014). In the kinzigites, the garnet is pluricentimetric in size with the occasional appearance of cordierite.

- Geosite 6: Peridotite of Aaraben; it belongs to the lower Sebtides units (Figs. 8, 9), which together with the upper Sebtides constitute a part of the internal zones of the Rifian Cordillera (Michard *et al.* 1997). From the structural point of view, the peridotites of Beni Bouzera, constitute the ultramafic body or "hard core" of the Sebtides units, which are composed of four tectono-metamorphic units (Frets *et al.* 2014), surrounded by a pile of crustal metamorphic rocks made of kinzigites, gneisses and micaschists with progressive decrease in metamorphism grade from bottom to top. These peridotites are rich in olivine (Fig. 7) showing yellowish, greenish or brownish tints.

- Geosite 7: Harzburgite of Aaraben; harzburgite (Fig. 7) occurs in the field as coarse-grained porphyroclastic with orthopyroxenes in porphyroclasts, bathing in a fine-grained olivine matrix, with interstitial Cr-diopsides (Fig. 10), while at the contact of pyroxenite ribbons, harzburgite may have one centimeter-sized Cr-diopside-spinel pockets (Chetouani 2016).

- Geosite 8: Serpentinite of Aaraben; ultrabasic rocks in contact with aqueous, hydrothermal (Figs. 11, 12), or metamorphic fluid hydrate to form partially or entirely serpentinized rocks. Their coloring as well as their flexible and scaly aspect is at the origin of the name of these rocks.

- Geosite 9: Pyroxenites of Aaraben; pyroxenite is an ultrabasic rock composed essentially of minerals of the pyroxene family (Figs. 7, 13), and constitutes an important geodynamic marker and witness of the internal cycle of the Earth, responsible of plate tectonics. The petrography of pyroxenites with garnet from the Beni Bousera orogenic massif provides information on how it was exhumed (El Attrassi *et al.* 2011).

- Geosite 10: Dunites of Aaraben; dunite is the upper olivine-rich member of the peridotite serie (Fig. 7). The dunite (Berger and Vannier 1984) is the result of the process of the partial fusion of mineral constituents of the peridotite. In the Beni Bousera massif, dunite (Fig. 14) outcrops within other facies (lherzolite or harzburgite) and shows chromiferous spinel streaks, where they are unaffected by magmatic infiltration.

Quantitative study

We have identified and characterized 10 geosites in the theme of metamorphism, which memorize structures, indices and original geological phenomena that are easy to locate in the field. The quantitative evaluation has led to the following results:

- Scientific Value (SV)

The average scientific value of the geosites in the study area is very high, it is about 3.6 (Tab. 2). This value is due to the following facts: i) the good state of conservation of the rock and its minerals, ii) the capacity of the geosites to illustrate the metamorphic processes and structures, and iii) the existence of published scientific studies on the geosites.

- Educational Use Potential (EUP) value

The average value of the educational use potential of the geosites of the Ghomara coast is very high (about 3.8) (Tab. 3). This value is explained by the proximity of most of the geosites to road and accessibility by all means of transportation, the non-existence of use restrictions and the association of all geosites with ecological and cultural values and the resistance of the geosites to destruction caused by students (low vulnerability).

- Degradation risk value

The average risk of degradation of the geosites is moderate (~ 2.4) (Tab. 4), because these main features of the geological elements have a probability of being damaged by anthropic or natural factors, and this is due to the lack of access control. To this factor is added the proximity of the sites of the study area to roads and unexpected territorial developments.

Conclusion

Taking into account the calculated values of the adopted quantification criteria, it is clear that these ten (10) sites of

INTRODUCTION

métamorphisme l'ensemble Le représente des transformations minéralogiques et texturales que subit une roche à la suite des changements dans les conditions de température (T) et/ou de pression (P). Son étude est utilisée globalement à des fins d'interprétation géodynamique et notamment la détermination du cadre tectono-métamorphique responsable de l'enfouissement et/ou de l'exhumation des roches dans les zones déformées. Ces déformations sont liées d'une part aux déplacements horizontaux des plaques lithosphériques les unes par rapport aux autres, et d'autre part aux déplacements verticaux produits, dans certaines chaînes de montagnes, par l'intermédiaire des structures tectoniques majeures comme les chevauchements, les nappes de charriages ou les zones de subduction (Raimbourg 2005).

Les roches métamorphiques sont, par conséquent, des marqueurs de réactions minéralogiques successives et forment des archives des évolutions passées. Elles permettent de conserver la trace de l'histoire de l'enfouissement et l'exhumation des matériaux dans les zones déformées au niveau du globe terrestre, d'où l'importance de l'étude et de l'enseignement du métamorphisme comme matière principale dans les programmes scolaires de l'enseignement des géosciences.

La côte des Ghomara constitue un secteur clé pour la compréhension des processus métamorphiques et des phénomènes qui leur sont associés. C'est la zone par excellence où il est possible d'observer des géosites traitant du métamorphisme HP/BT, des roches mantelliques et leur mise en place dans le cadre de la tectonique des plaques, (Kornprobst 1969, Kornprobst 1974, Kornprobst et al. 1975, Pearson et al. 1989, Pearson et al. 1993, Bouybaouene 1993, Saddiqi 1995, Bouybaouene et al. 1998, Montel et al. 2000, Negro et al. 2006, Chalouan et al. 2011, Afiri et al. 2011, Romagny 2014, Chetouani et al. 2016, El Bakili 2021, Farah et al. 2021, etc.). Et ceci depuis le village de Targha où l'on observe le long de la côte une pile de roches métamorphiques crustales avec différents grades de métamorphisme (kinzigites, gneiss, micaschistes et schistes), entourant un massif de roches mantelliques (les péridotites) qui affleurent par exhumation.

Le territoire de la côte des Ghomara qui fait partie du domaine interne de la chaîne rifaine comporte : i) les Sebtides formées de terrains métamorphiques paléozoïques et triasiques (Milliard 1959, Kornprobst 1974), ii) les Ghomarides formées de terrains essentiellement paléozoïques peu à pas métamorphiques avec une couverture méso-cénozoïque très réduite (Chalouan 1986), et iii) la Dorsale calcaire formée de terrains carbonatés triasico-jurassico-crétacés et terrigènes tertiaires (Nold *et al.* 1981).

Ces terrains font partie d'après leur degré métamorphique (Fig. 1) aux :

geological interest are characterized by an average value of SV that is very high and estimated at 3.60 and of which the 10 sites have a very high value that exceeds 3.5 and are considered geosites. The average CPUE values are very high (3.8), however the risk of degradation is moderate (~2.4). Therefore, these geosites can be valued in 10 stops (Fig. 15) in an educational road of teaching geology (georoad) and whose theme is the characteristic metamorphism of the regional geology in its relationship with the geodynamics, responsible of the structural evolution of the peri-plate chain of the Rif.

i) Sebtides inférieures composées de micaschistes, de gneiss et également de kinzigites, formant une auréole autour du massif péridotitique de Beni Bousera (Michard *et al.* 2006, Chalouan *et al.* 2011) et ii) Sebtides supérieures ou unités de Federico constituées de schistes qui sont affectés par un faible métamorphisme alpin (Michard *et al.* 2008).

Ce tronçon de la chaîne rifaine, objet de cette étude, offre aux étudiants, chercheurs débutants et passionnés de la géologie, la possibilité de comprendre l'évolution alpine de la chaîne rifaine. Cette chaine est une chaîne de montagnes développée à la suite de la fragmentation au Miocène (23,5 Ma) de l'ALKAPECA (Bouillin et al. 1986) ou terrain méso-méditerranéen (Guerrera et al. 1993) et migration vers les marges de l'Afrique-Iberia-Adria de la microplaque d'Alboran (e.g., Chalouan et al. 2000, 2001, 2008, Benmarha et al. 2021) placée entre les plaques européennes et africaines depuis l'époque Crétacé. Ce territoire qui cache une période importante de l'histoire géologique du Rif, abrite des témoignages remarquables sur les différents processus géologiques qui se sont produits dans les racines profondes des chaînes de haute montagne et qui sont d'une importance fondamentale pour la compréhension de l'histoire paléogéographique mondiale.

Pour contribuer à la mise en valeur du potentiel géologique du secteur de la côte des Ghomara, nous avons tenu à dresser un premier inventaire des sites à intérêt géologique (SIGeos) à vocation pédagogique et traitant du métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques.

METHODOLOGIE

L'inventaire des géosites consiste à réaliser une base de données essentielle comportant leur identification, caractérisation, et évaluation quantitative des sites d'intérêt géologique recensés, et les résultats seront décisifs dans toute stratégie de géoconservation (Brilha 2005, Henriques et al. 2011). L'inventaire est alors un processus délicat qui nécessite la mise en place d'une méthode scientifique afin de cerner l'ensemble des aspects qui le gouvernent. Ceci impose de passer en revue la littérature existante et qui traite ce sujet. Cette littérature aura pour conséquence de déceler les méthodes et techniques utilisées pour caractériser et évaluer un site géologique. Ces critères sont mentionnés dans presque toute la littérature concernant le géoheritage, tels que le JNCC (1977), Lapo et al. (1993), de Wimbledon et al. (1995), Grandgirard (1999), Alexandrowicz & Kozlowski (1999), Parkes & Morris (1999), Brilha (2005), Reynard et al. (2007), García-Cortés & Carcavilla Urquí (2009), De Lima et al. (2010), Fuertes Gutiérrez & Fernández-Martínez (2010), Díaz Martínez & Díez-Herrero (2011), Wimbledon (2011), Reynard & Coratza (2013), Gray (2013), De Wever et al. (2014), Brilha (2016), Reynard et al. (2016), Bouzekraoui et al. (2017), Arrad et al. (2018), Aoulad Sidi

Mhend *et al.* (2019, 2020), Mehdioui *et al.* (2020), Mirari *et al.* (2020).

Pour l'inventaire des géosites, nous avons procédé au remplissage des fiches (Aoulad Sidi Mhend *et al.* 2019, 2020), établis à ces fins, lors des missions de terrain que nous avons réalisées pour étudier les sites présentant des indices de terrains à valeurs géologiques et pouvant former des arrêts pédagogiques thématiques relatifs au thème du métamorphisme. Pour l'identification de ces sites étudiés, des coupes de terrain sont réalisées, des vues panoramiques et rapprochées de paysages et des photos de détail sont prises.

Pour la caractérisation de leurs valeurs scientifique, de potentiel d'usage éducatif et de risque de dégradation, nous nous sommes basés sur un ensemble de critères dont leurs scores et leurs pondérations sont groupés et colligés dans le tableau 1.

Pour la quantification des géosites étudiés dans ce travail, nous nous sommes basés sur la même fiche qui servait pour leur identification et caractérisation. La fiche comprend en plus d'une partie d'identification et de description, autres parties qui servent à la caractérisation et l'évaluation quantitative. La méthode utilisée pour la quantification des géosites est mentionnée dans les travaux de Brilha (2016), Reynard *et al.* (2016), Aoulad Sidi Mhend *et al.* (2019, 2020) et Mirari *et al.* (2020).

On procède par le calcul des valeurs des géosites par la somme de l'estimation de leurs critères pondérés avec les formules suivantes :

$$\begin{split} VS &= (Rpt + Int + Rar + LC + CS + DG + LU). \\ PUE &= (Vul + Acc + LU + Séc + Log + DP + AV + Pay + Uni + CO + PD + DG). \end{split}$$

RD = (Dg + PD + PJ + Acc + DP).

Cette quantification se fait par l'attribution des scores 1, 2, 3 et 4 (faible, moyen, élevé et très élevé respectivement) pour chaque critère. Les valeurs des géosites décrits dans ce travail ont été calculées par la somme de ses critères pondérés (Brilha 2016, Aoulad Sidi Mhend 2019).

DESCRIPTION DES GEOSITES

Les données issues des documents cartographiques et de la bibliographie existante (El Bakili 2021, Farah *et al.* 2021 et références in), ainsi que les travaux de terrain réalisés, nous ont permis de sélectionner dix géosites dans le secteur de la côte des Ghomara à valeurs géologiques et pédagogiques importantes. Ils sont présentés, selon leur position sur la route nationale N 16 depuis Oued Laou jusqu'à la vallée de Sidi Yahya Aarab (Fig. 1) :

Géosite 1 : Schistes et quartzites du Permo-Trias de Tizgarine

Dans ce géosite (35°23'36,33"N/ 5°09'11,80"W) (Fig. 1), les roches se composent de schistes et grès rutilants à passées conglomératiques de couleur rouge et quartzites blancs, rosés et verdâtres d'âge permo-triasique ayant subi un métamorphisme BP-BT (3-1 kbar et 300°C) (e.g., Bouybaouene 1993, Bouybaouene et al. 1995, Michard et al. 1997, Vidal et al. 1999). Ces roches, qui font partie de l'Unité de Tizgarine (Fig. 2A), ont pris le nom du village de Tizgarine qui se trouve à 6 km de l'Oued Laou au sud de Tétouan. Čes roches rouges (Fig. 2B, 2C) sont riches en Chloritepyrophylite-phengite (Chalouan et al. 2011) et constituent avec les phyllites violettes de l'Unité de Boquete d'Anjra en position intermédiaire (Fig. 3A), et des quartz-phyllites de couleur foncée (couleur de fumée) des unités de Beni Mzala 2 et 1 en position basse, les Sebtides supérieures ou unités de Federico. Cette évolution de la couleur peut être corrélée avec un changement du grade de métamorphisme (Durand-Delga & Kornprobst 1963).



Figure 1. Carte structurale de la zone d'étude et emplacement des géosites décrits dans ce travail (d'après Suter 1980, modifiée). Figure 1. Structural map of the study area and location of the geosites described in this work (after Suter 1980, modified).

Tableau 1 : Critères de la valeur scientifique, le potentiel d'usage éducatif et le risque de dégradation, leurs scores et leurs pondérations. *Table 1: Criteria of scientific value, educational use potential, and risk of degradation, their scores and weights.*

Valeurs	Criteres (scores 0 à 4) *	Poid (%)
	Representativité (Rpt)	30
	Intégrité (Int)	20
	Rareté (Rar)	5
Valeur Scientifique	Localité clé (LC)	15
(V3)	Connaissance Scientifique (CS)	5
	Diversité Géologique (DG)	15
	Limitations d'utilisation (LU)	10
	Vulnérabilité (Vul)	10
	Accessibilité (Acc)	10
	Limitations d'utilisation (LU)	5
	Sécurité (Séc)	10
	Logistiques (Log)	5
Potentiel d'usage	Densité de la population (DP)	5
éducatif (PUE)	Association avec d'autres valeurs (Av)	5
	Paysage (Pay)	5
	Unicité (Uni)	5
	Conditions d'observation (CO)	10
	Potentiel didactique (PD)	20
	Diversité Géologique (DG)	10
	Détérioration des éléments géologiques (Dg)	35
Risque de	Proximité d'activitiés qui causent une dégradation (PD)	20
Dégradation	Protection Juridique (PJ)	20
(RD)	Accessibilité (Acc)	15
	Densité de la population (DP)	10



Figure 2. A. Coupe structurale dans les Sebtides passant par la transversale de Ras Aaraben Chalouan *et al.* (2008), B. Schistosité subverticale dans les schistes de Tizgarine, C. Plissement dans les schistes.

Figure 2. A. Structural cross-section in the Ras Aaraben transversal showing the Tizgarine shales Chalouan et al. (2008). B. Subvertical schistosity in Tizgarine shales, C. Shales folding.

Géosite 2 : Contact Ghomarides/Sebtides (Faille de Zaouia)

Ce géosite (35°23'48,10"N/ 5°01'46,03"W) (Fig. 1), offrant la possibilité d'observer le contact Ghomarides-Sebtides, est considéré comme parmi les rares sites où il est possible d'observer et d'examiner la nature du contact entre ces deux principales unités du domaine interne. Classiquement appelé faille de Zaouia, il est situé sur la route N-16 qui relie Kaa-Asras à Targha et se trouve proche du grand virage concave en face de la borne N°152. A ce niveau, on y observe de la superposition anormale des schistes argilo-luisants à passées conglomératiques affectés par le métamorphisme hercynien (faciès schistes verts, avec faible développement de la biotite, caractérisant la nappe d'Akaïli (base des Ghomarides) sur les micaschistes de Filali sous faciès amphibolite (développement de staurotide ± grenat) (Fig. 3A) formant la partie supérieure de la pile des nappes des Sebtides inférieures (Fig. 3B). Le métamorphisme affectant les phyllades Ghomarides est principalement varisque (phase hercynienne), jusqu'au toit des Ghomarides. Celui des micaschistes de Filali est principalement alpin, d'après les âges isotopiques entre 20 et 25 Ma qu'on mesure dans toute l'Unité des Sebtides.

Le contact est difficilement reconnaissable à cause de la nature schisteuse des deux formations. Les plans de la schistosité dans les phyllades Ghomarides ont un pendage de 30 à 50° vers le SE et montrent une linéation d'étirement (zones abritées) orientée N40, associée à des plis isoclinaux de même direction axiale. Les micaschistes des unités Sebtides montrent des plans de schistosité à pendage général de 20 à 30° vers le NO et une linéation d'étirement N160 avec de rares minéraux en baguettes noires de staurotide sur les plans de schistosité (Chalouan *et al.* 2011).

L'analyse minutieuse de la zone de contact entre les deux unités montre que celui-ci est souligné par une cataclasite (brèche tectonique) avec un miroir de faille (faille de Zaouia) assez bien exposé (Fig. 3C). Le plan de la faille est incliné de 30° vers le NW et les marqueurs cinématiques (stries) (Fig. 3C) sur le miroir de la faille et dans les schistes des deux unités montrent que la faille de Zaouia a un jeu normal. Ainsi, la faille de Zaouia apparaît comme une faille normale à faible pendage ayant contribué à l'exhumation des Sebtides (Chalouan *et al.* 2011).

Cette faille est en relation avec l'ouverture du bassin d'Alboran dès le Miocène inférieur. Chalouan *et al.* (1995) et Chalouan *et al.* (2008) affirment que cette faille associée à la phase D1 est post-Burdigalien (Miocène inférieur) et anté-Pliocène. La plupart des failles, liées à cet épisode d'extension qui est responsable de l'ouverture du bassin d'Alboran, sont situées aux alentours du massif de Beni Bousera et il est alors probable que les failles de cette zone aient accommodé l'exhumation du massif.

Géosite 3 : Micaschistes de Targha

C'est un site (35°23'25,34"N/ 5°00'27,80"W) (Fig. 1) d'intérêt pétrologique où affleurent des micaschistes de couleur gris-noirâtre, appartenant à l'unité géologique de Sidi Ahmed el Filali (Kornprobst 1974, Kornprobst *et al.* 1975, El Maz & Guiraud 2001), elle-même appartenant aux Sebtides inférieures (Fig. 1). Les formations géologiques contenant ce type de roches s'étendent sur la côte méditerranéenne depuis Zaouia au nord de Targha jusqu'à Taghassa au sud-est. Les micaschistes de Targha (Fig. 4 A) correspondent à des schistes ampélitiques montrant des alternances de lits gréseux clairs caractérisés par la présence d'une association minérale à muscovite, grenat (Fig. 4 C, 4 D), et staurotide (Michard *et* *al.* 2006, Chalouan *et al.* 2011) et de lits d'origine pélitique riches en matière charbonneuse (schiste graphiteux) (Fig. 4 B) dispersée dans un fond microcristallin formé de quartz et de micas.

Ces micaschistes sont le résultat d'un métamorphisme HT-BP associé à une décompression de 6 kbar et 3 kbar et une légère diminution de la température de 650°C à 550°C pendant l'Oligo-Miocène (Afiri *et al.* 2011, El Maz & Guiraud 2001). La présence des impuretés charbonneuses témoigne de la brûlure de la matière organique lors du processus de métamorphisme. La stratification S_0 est soulignée par des lits riches en Quartz. Des flexures en forme de S induisant des crénelures sont observables macroscopiquement dans les micaschistes de Targha (Fig. 4E). Des veinules de quartz et d'andalousite sont également observables dans ce faciès.

Géosite 4 : Les Gneiss de Stehat

L'affleurement des Gneiss de Stehat (35°20'59.43"N/ 4°57'26,74"W) (Fig. 1), situé au bord de la plage (Figs. 2A, 5A) offre la possibilité d'observer des exemples de structures métamorphiques très pédagogiques puisqu'ils présentent un aspect folié (Fig. 5B). C'est une foliation diffuse matérialisée par une alternance de lits clairs (les leucosomes formés exclusivement de quartz, feldspaths potassique et plagioclase) et de lits sombres (les mélanosomes formés de grenat, biotite, sillimanite et cordiérite) (Kornprobst 1969, 1974). Les lits feldspathiques et les lits micacés sont irrégulièrement plissés (Fig. 5C) dessinant une foliation en « flammèche » mettant en jeu la déformation d'une matière rendue plastique par un début de fusion partielle (migmatisation) responsable de la disparition de la schistosité et l'apparition de la foliation diffuse. Cette foliation métamorphique est le résultat de la fusion du quartz et des feldspaths alcalins se développant sous forme de rubanements lenticulaires (Fig. 5 B) plus au moins parallèles. De point de vue minéralogique, ces gneiss sont composés de quartz, plagioclases, feldspaths alcalins, biotite, sillimanite et muscovite. Des grenats millimétriques sont observables dans ce faciès (Fig. 5E). Des enclaves de métapélite sont également observables dans ces gneiss (Fig. 5D); elles correspondent à des reliques de la roche mère qui a échappé à la fusion (paléosome).

Le géosite 4 est un site dans lequel il est possible de voir un bel exemple de métamorphisme en passant des micaschistes au stade de foliation diffuse et même l'apparition des gneiss oeillés formés par de gros cristaux de feldspath. Il témoigne d'un métamorphisme alpin polyphasé (Chalouan & Michard 2004). Le métamorphisme qui a affecté l'Unité de Filali montre une évolution HT-BP associée à une décompression de 9 kbar à 4-3 kbar avec une légère baisse de température (de 750°C à 750-650°C) (Romagny 2014). Dans le détail, cette évolution correspond à une exhumation isotherme, suivie d'une décroissance de la température. Les datations isotopiques suggèrent un âge Miocène inférieur (22-19 Ma) pour cette évolution (Chalouan *et al.* 2011).

Quelques reliques de granulites mafiques caractéristiques des faciès de plus haute pression ont été décrites dans les formations basales de ces gneiss et sont les témoins de leur histoire métamorphique précoce et qui ont préservé des assemblages minéralogiques caractéristiques du faciès granulitique HP, à 15,7-13,3 kbar et 890-810°C (Aghzer & Haissen 2005, Romagny 2014). Ces formations ont ensuite subi une décompression quasi-isothermale jusqu'à des conditions de 13-10,3 kbar et 830-710°C dans les gneiss de Filali (Aghzer & Haissen 2005).



Figure 3. A. Coupe géologique dans le domaine interne montrant l'emplacement de la Faille de Zaouia (d'après Romagny 2011), B. Photo montrant le contact Ghomarides-Sebtides dans le secteur de Zaouia, C. Miroir de faille avec des indicateurs cinématiques indiquant le jeu normal de la faille.

Figure 3. A. Cross section in the internal domain showing the Zaouia Fault (after Romagny 2011), B. Photo showing the Ghomarides-Sebtides contact, C. Fault mirror with cinematic indicators showing a normal character of the Zaouia fault.



Figure 4. A. Village médiéval de Targha bâti sur les micaschistes. B. Micaschistes riches en matière charbonneuse, C. Staurotides soulignant les plans de schistosité, D. Grenats, E. Plis en chevrons.

Figure 4. A. Medieval village of Targha built on the micaschists. B. Micaschists rich in carbonaceous material, C. Staurotides underlining the planes of schistosity, D. Garnets, E. chevron folds.

Géosite 5 : Les Kinzigites de Chmaâla

Dans ce site (35°19'31, 25''N/ 4°56'03,61''W) (Fig. 1), les kinzigites, roches métamorphiques d'origine crustale, constituent une auréole autour des péridotites de Beni Bousera, et forment avec ces dernières les Sebtides inférieures (Fig. 6A). Ce site est d'une très grande importance, il est le seul au Maroc où la kinzigite y affleure avec une fraicheur spectaculaire. La Kinzigite fait partie d'un complexe de Gneiss et de migmatites à métamorphisme de degré catazonal. Le processus de sa formation est étroitement lié à l'emplacement des péridotites de Beni Bousera. Romagny (2014) cite pour ces roches des conditions de pression et de température estimées à 13-9 kbar et 850-800°C dans un premier instant puis à 5-4 kbar et 750-650°C durant un stade de refroidissement et de décompression. Bouybaouene *et al.* (1998) citent des reliques de l'épisode HP (20- 16 kbar) / HT (820-760°C) dans ces mêmes kinzigites(granulites d'Ichendirene).

Sur le plan pétrologique, les kinzigites renferment des grenats pluricentimétriques (Fig. 6B) avec l'apparition parfois de la cordiérite. La kinzigite serait un gneiss basifié à la suite du départ de ses constituants alcalins, ces derniers ayant été mobilisés au cours de la phase d'anatexie partielle précédente.



Figure 5. A. Plage de Stehat, photo prise depuis le rocher gneissique de Msabgha au nord, les kinzigites et les péridotites au sud, B. Aspect folié et plissé des gneiss, C. Foliation en « flammèche », D. Paléosome (métapélite) ayant échappé à la fusion, E. Grenats dans le faciès gneissique.

Figure 5. Stehat beach, photo taken from Msabgha gneissic rock in the north, Kinzigites and peridotites in the south, B. Foliated aspect of gneisses, C. "Flame" foliation, D. Paleosome (metapelite) having escaped melting, E. Garnets in the gneissic facies.

La Kinzigite serait alors une restite (Chetouani 2016). Dans ce processus de la métasomatose, la désalcalinisation des restites compenserait la suralcalinisation des migmatites. Elle est couramment associée à des gneiss, leptynites à tourmaline, et/ou à des granulites (Kornprobst *et al.* 1990). Sur le plan structural, le contact entre les kinzigites et les péridotites sous-jacentes a joué en faille normale ductile à l'Oligo-Miocène, ce qui aurait accommodé l'exhumation des unités de Beni Bousera (Afiri *et al.* 2011).

Géosite 6 : La péridotite d'Aaraben

Dans ce géosite (35°17'11,09"N/4°53'39,44"W) (Fig.1), le complexe péridotitique fait partie des Sebtides inférieures qui constituent avec les Sebtides supérieurs les unités Sebtides de la zone interne du Rif (Michard *et al.* 1997). Le massif est traversé du NW au SE par cinq vallées (oueds) plus ou moins parallèles dirigées N30-N40 (Fig. 8A). Habituellement, la topographie du massif de Beni Bousera est très raide (instable) et influe fortement sur l'accessibilité de la zone.

Les péridotites de Beni Bousera, constituent le corps ultrabasique ou «noyau dur» des sebtides qui sont composées en plus de quatre unités tectono-métamorphiques d'origine crustale (kinzigites, gneiss, micaschistes et schistes de l'Unité de Filali) (Frets *et al.* 2014) et où le degré de métamorphisme diminue de la base de la séquence vers le haut (Fig. 7). La péridotite est alors une roche ultrabasique provenant du manteau supérieur, exhumée vers les unités crustales du domaine interne de la chaîne rifaine. Le massif de péridotites dessine une antiforme à axe orienté NW-SE parallèlement au littoral (Kornprobst 1969).

Sur le plan pétrologique, la péridotite est composée de différents types (Fig. 7) : des lherzolites, des harzburgites, des dunites et une grande diversité de rubanements de pyroxénites (Pearson *et al.* 1989, 1993, Gysi *et al.* 2011, Frets *et al.* 2012, Chetouani *et al.* 2016, Hajjar *et al.* 2016).

Les péridotites sont composées de minéraux identifiables à l'œil nu en raison de leur taille millimétrique et parfois centimétrique (Fig. 8B). L'olivine d'une couleur verdâtre à jaunâtre est le minéral le plus abondant (50 à 60% en volume) et dont l'altération superficielle donne une teinte rouille aux affleurements de lherzolite. Le clinopyroxène verdâtre et l'orthopyroxène a reflet doré sont bien visibles macroscopiquement, le spinelle d'aspect noirâtre est interstitiel (Fig. 8B).

D'autres minéraux bien moins fréquents (comme le diopside) mais tout aussi importants dans la reconstitution de l'évolution des lherzolites peuvent les accompagner.

Selon Afiri *et al.* (2011), les péridotites ont subi une décompression quasi-isothermale jusqu'à des conditions de pression de 12 ± 3 kbar et de température de 800°C.

Le long de la route N16, il est possible d'observer des miroirs de failles décamétriques (Fig. 8C), dirigés N100-110 avec un pendage de 50-60°N et des stries avec un pitch de 90°, compatibles avec un jeu normal (Romagny 2014). L'existence de la serpentinite et de la carbonatation indiquent qu'elles sont dues à une déformation fragile couplée à un hydrothermalisme superficiel. La serpentinite est le résultat de l'altération de la péridotite qui émet un talc-carbonate magnésien (Magnésite) de couleur blanche (Fig. 8C), formé par une série de réactions de transfert net de H2O et CO2 (Honsberger & Laird 2018).

La lherzolite à spinelle constitue la lithologie prédominante dans le massif de Beni Bousera. Deux textures principales peuvent être distinguées pour les lherzolites à spinelle : i) La lherzolite porphyroclastique à gros grains avec l'orthopyroxène interstitiel, le Cr-diopside et le spinelle formant des structures de réseau hétérogènes entourant l'olivine granulaire et semble affectée par un fluide de percolation (Chetouani 2016). Des structures réticulaires hétérogènes entourant l'olivine granuleuse et semble affectée par la percolation. Cette texture hétérogène est probablement due à une fusion partielle faible des péridotites et à un grossissement des grains par les « liquides » magmatiques affectant le centre du massif dans le subfaciès Seiland (Chetouani 2016) ; ii) La Iherzolite porphyroblastique avec orthopyroxène porphyroblastique grossièrement arrondi et/ou en forme de lentille, le clinopyroxène porphyroblastique à interstitiel, l'olivine en grains fins et le spinelle interstitiel (Fig. 9A).

Elle peut être affectée par des processus de recristallisation qui rendent plus grossière la structure de la lherzolite par l'augmentation de la taille des pyroxènes mais semble moins affectée par les fluides de percolation que la lherzolite avec les pyroxènes interstitiels, sauf près du Cr-diopside provenant des structures de réseau interstitielles (Fig. 9B).

Géosite 7 : les harzburgites d'Aaraben

Dans ce site (35°16'52"N/ 4°53'49"W) (Fig. 1), les harzburgites (Fig. 7) sont réparties de façon hétérogène dans les lherzolites à spinelles et forment des zones larges de quelques mètres. A l'échelle de l'affleurement, elles sont souvent associées à des bandes composites de pyroxénite qui s'étendent sur 5 cm à 3 m d'épaisseur, alternant avec des bandes dunitiques. Les harzburgites se présentent sur le terrain sous forme porphyroblastique à gros grains avec des orthopyroxènes en porphyroclastes baignant dans une matrice d'olivine à grains fins (Chetouani 2016), avec des Cr-diopsides interstitiels (Fig. 10A), tandis qu'au contact des rubanements de pyroxènites, la harzburgite peut présenter des poches de 1cm de Cr-diopside-spinel (Fig. 10B). La texture des harzburgites est principalement porphyroclastique à gros grains, matérialisée par de grands porphyroclastes d'orthopyroxènes allongés et fortement déformés (3-15 mm) avec des exsolutions lamellaires avec des reliques de minéraux recristallisés.

Géosite 8 : La serpentinite d'Aaraben

Ce géosite (35°17'11"N/ 4°53'33"W) (Fig. 1), présente des roches ultrabasiques qui sont en contact avec un fluide aqueux, hydrothermal, ou métamorphique qui s'hydratent pour former des roches partiellement ou totalement serpentinisées nommées « Serpentinites ». Le phénomène de serpentinisation consiste donc en l'hydratation de la péridotite et la recristallisation des constituants des minéraux du groupe des serpentines au profit des minéraux anhydres (O'Hanley 1996). Les serpentines correspondent à des phyllosilicates trioctaédriques dont le feuillet de type TO est formé d'une couche tétraédrique silicatée (T), et une couche octaédrique (O) magnésienne ou nickélifère, formant une solution solide entre le pôle magnésien et nickélifère (Mellini 1982). Les études menées sur le phénomène de serpentinisation montrent que ce processus est contrôlé par deux paramètres : la température et le rapport eau/roche (Marcaillou 2011). Leur coloration ainsi que leur aspect souple et écailleux sont à l'origine du nom de ces roches : les roches ophidiennes (du grec ophidis, serpent), et de la forme minérale : la serpentine (du latin serpentinus qui signifie serpent de pierre). Les sols issus de la dégradation de la serpentine sont toxiques pour beaucoup de plantes à cause de leur teneur élevée en nickel, chrome et cobalt, la croissance des plantes peut également se trouver inhibée par un fort taux de potassium, phosphore ainsi

qu'un appauvrissement du couple calcium/magnésium. Le massif est serpentinisé à un degré relativement faible avec de petites serpentines noires qui s'insinuent dans les péridotites localement et des failles de 3 à 10 cm d'épaisseur remplies de serpentine noire, verte et jaune.

La serpentinisation est concentrée au toit du massif (le long de la zone mylonitisée) et sur la face nord-est du massif en contact avec la méditerranée (Fig. 11A) (Hajjar *et al.* 2016, Chetouani 2016). Mais cette serpentinisation peut s'infiltrer au cœur du massif comme c'est le cas de la partie NE du massif, près de la vallée d'Aaraben (Fig. 11B) Chetouani (2016).

Les péridotites de Beni Bousera ont été soumises à un stade de serpentinisation généralisée probablement à basse température (inférieur à 400 °C, Hajjar 2016). Elle se manifeste par la formation de texture maillée (Fig. 12A, 12B), et la texture fibreuse (Fig. 12C, 12D) le long des plans de foliation dans les péridotites fortement serpentinisées (Hajjar 2016).



Figure 6. A. Coupe géologique montrant la structure en antiforme des Sebtides inférieures (Romagny 2011), B. kinzigites à grenats pluricentimétriques. C. Faciès gneissique avec des lits feldspathiques et micacés plissés.

Figure 6. A. Geological cross section showing the antiformal structure of the lower Sebtides (Romagny 2011), B. Multi-centimetric garnet in kinzigites. C. Gneissic facies with folded feldspathic and micaceous beds.



Figure 7. Diagramme triangulaire pour la classification des roches ultrabasiques, montrant la composition modale primaire des péridotites et des pyroxénites de Beni-Bousera (d'après Chetouani *et al.* 2016).

Figure 7. Triangular plot for the classification of ultramafic rocks, showing the primary modal composition of the Beni-Bousera peridotites and pyroxenites (after Chetouani et al. 2016).



Figure 8. A. Paysage péridotitique avec aspect de cette roche à l'état altéré et frais. B. Lherzolite avec du spinelle bien visible à l'œil nu. C. Miroir de faille sur la route N16 avec talc-carbonate (magnésite).

Figure 8. A. Peridotitic landscape with the aspect altered and fresh of the rock. B. Spinel lherzolite clearly visible to the naked eye. C. Fault mirror on N16 with talc-carbonate (magnesite).



Figure 9. A. Lherzolite à spinelle à gros grains avec des infiltrations interstitielles. Les pyroxènes (vert-brun) et le spinelle (noir) sont interstitiels (domaine Seiland, vallée d'Aaraben). B. Lherzolite à spinelle porphyroblastique avec des Cr-diopsides (vert) interstitiels formant des structures en réseaux (Domaine de transition Aiegite-Seiland, vallée d'Aaraben).

Figure 9. A. coarse granular spinel lherzolite with interstitial infiltrations. Pyroxenes (green-brown) and spinel (black) are interstitial (Seiland domain, Aaraben valley). B. Porphyroblastic spinel lherzolite with interstitial Cr- diopside forming networks beside boundaries (Ar-Se transition domain, Aaraben valley).



Figure 10. A. Cr-diopside (couleur verte) et spinelle (noir) interstitiels dans la harzburgite porphyclastique. B. Poche de Cr-diopside-spinelle dans la harzburgite porphyroblastique. (Domaine Seiland, vallée d'Aaraben) (d'après Chetouani 2016).
Figure 10. A. Interstitial Cr-diopside (green color) and spinel (black) in porphyclastic harzburgite. B. Cr-diopside-spinel pocket in porphyroblastic harzburgite. (Seiland domain, Aaraben valley) (after Chetouani 2016).



Figure 11. A. Serpentine (noirâtre) au contact d'un filon de granite recoupant la péridotite dans la vallée d'Amter. B. Serpentine dans une lherzolite à spinelle, vallée d'Aaraben (d'après Chetouani 2016).

Figure 11. A. Serpentine (blackish) at the contact of a granite vein cutting the peridotite in the Amter valley. B. Serpentine in a spinel lherzolite, Aaraben Valley (after Chetouani 2016).

Les serpentines sont donc des minéraux qui tirent leurs origines des métamorphoses et altérations des péridotites et des pyroxènes sous l'effet de la chaleur et d'une hydratation, c'est le métamorphisme hydrothermal. L'antigorite est le polymorphe de la serpentine le plus courant, issu du métamorphisme humide des roches ultrabasiques tout en restant stable jusqu'à des températures de 600°C et à des profondeurs de 60 km ou plus.

Géosite 9 : Les pyroxénites d'Aaraben

Dans ce site $(35^{\circ}16'54''N/4^{\circ}53'48''W)$, la pyroxénite est une roche ultrabasique composée essentiellement de minéraux de la famille des pyroxènes (Fig. 7), au minimum 60 % en masse selon la classification des roches ultrabasiques. Les pyroxénites sont des marqueurs géodynamiques importants, témoins du cycle interne de la terre responsable de la tectonique des plaques. La pétrographie des pyroxénites à grenat du massif orogénique de Beni Bousera apporte des informations sur les modalités de son exhumation (El Attrassi *et al.* 2011). Les pyroxénites à grenat contenant des agrégats de graphite se sont bien formées à des profondeurs asthénosphériques comme en atteste la découverte de microdiamants préservés dans ces agrégats. Les diamants millimétriques, précurseurs de ces agrégats, composaient la paragenèse primaire de ces pyroxénites avec le grenat et les pyroxènes, comme l'indique la composition des inclusions de silicate contenues dans les agrégats de graphite.

Les pyroxènes forment un ensemble varié de minéraux sombres. Leur système de cristallisation conduit à distinguer les orthopyroxènes et les clinopyroxènes. Les orthopyroxènes sontpurement ferromagnésiens, de composition $\text{Si}_2\text{O}_6(\text{Fe},\text{Mg})_2$, formant une série continue entre un pôle magnésien et un pôle ferreux. Les clinopyroxènes peuvent être : i) calco-ferromagnésiens $\text{Si}_2\text{O}_6(\text{Ca},\text{Fe},\text{Mg},\text{Ti},\text{Al})_2$; les principaux sont le diopside et l'augite ; ii) sodiques avec notamment la jadéite $\text{Si}_2\text{O}_6(\text{Al},\text{Na})$, minéral du métamorphisme.

Le massif péridotitique de Beni Bousera contient une grande diversité de rubanements de pyroxénites (Chetouani *et al.* 2015, 2016). Les plus spectaculaires sont les pyroxénites déformées de façon isoclinale de l'Oued Sidi Yahia Aarab (Fig. 13). Ce SIGeo permet de bien visualiser ces rubanements de pyroxénite en alternance avec la péridotite et montre que ces pyroxénites ont subi une déformation à l'état fluide.



Figure 12. Microphotographies illustrant les différents degrés de serpentinisation, vallée d'Aaraben. A, B : Serpentinite à texture maillée affectant l'olivine. C, D : Serpentine fibreuse avec quelques reliques d'olivine (d'après Hajjar *et al.* 2016).
Figure 12. Microphotographs illustrating different degrees of serpentinization, Aaraben valley. A, B: Mesh-textured serpentinite affecting olivine. C, D: Fibrous serpentine with some olivine relics (after Hajjar et al. 2016).



Figure 13. Rubanement de Pyroxénite plissée (35°16'54''N/ 4°53'48''W). Figure 13. Ribbon of folded pyroxenite (35°16'54''N/ 4°53'48''W).

Géosite 10 : Les dunites d'Aaraben

Ces dunites affleurent après avoir emprunté un sentier le long de la vallée où coule Oued Sidi Yahya Aarab suite à une vingtaine de minutes de marche depuis le pont qui se trouve sur la N-16 (35°16'54"N/ 4°53'47"W). Dans un panorama péridotitique apparait une roche à aspect jaunâtre de structure grenue et constituée de plus de 90 % d'olivine. C'est le membre supérieur riche en olivine de la série des péridotites (Fig. 7). La dunite (Berger & Vannier 1984) est le résultat du processus de la fusion partielle des constituants minéraux des péridotites. Les péridotites de type lherzolite sont surtout constituées d'olivine, d'orthopyroxène (en général, enstatite) et de clinopyroxène; elles possèdent aussi une grande proportion de composés de type basaltique (grenats et clinopyroxènes). La fusion partielle de la lherzolite et l'extraction de la partie liquide peut laisser un résidu solide de type harzburgite, riche en olivine et relativement riche en orthopyroxène, mais pauvre en clinopyroxène. Cela est dû au fait que le clinopyroxène fond à plus basse température que l'orthopyroxène ou l'olivine. En continuant la fusion, l'orthopyroxène fond à son tour et on aboutit à la dunite (Fig. 14).

ETUDE QUANTITATIVE DES GEOSITES

Après une description qualitative des géosites identifiés le long de la côte des Ghomara, nous avons procédé à la réalisation d'une évaluation quantitative de ces sites. Cette quantification s'est effectuée par le calcul des valeurs suivantes (Tabl. 1):

i) La Valeur Scientifique (VS) qui se base sur sept critères qui sont : l'intégrité (Int), la Représentativité (Rep), la Rareté (Rar), la Localité Clé (LC), la Connaissance Scientifique (CS), la Diversité Géologique (DG), et les Restrictions d'Utilisation (RU).

ii) La valeur du Potentiel d'Utilisation Éducative (PUE) est basée sur douze critères qui sont : la Vulnérabilité (Vul), l'Accessibilité (Acc), la Limitation d'Utilisation (LU), la Sécurité (Séc), la Logistique (Log), la Densité de la Population (DP), l'Association avec d'autres Valeurs (AV), le Paysage (Pay), l'Unicité (Uni), les Conditions d'Observation (CO), le Potentiel didactique (PD) et la Diversité Géologique (DG).

iii) Le Risque de dégradation (RD) qui est constitué de cinq critères qui sont : la Détérioration des Eléments Géologiques (DEG), la Proximité de secteurs/activités avec Potentiel de causer la Dégradation (PPD), la Protection Juridique (PJ), l'Accessibilité (Acc) et la Densité de Population (DP).

Valeur scientifique (VS)

Les résultats de la valeur scientifique et les moyennes de ses critères sont synthétisés dans le tableau 2.

La valeur scientifique moyenne des géosites étudiés est très élevée, elle est de l'ordre de 3,6. Cette valeur est due aux faits suivants:

- i) Le bon état de conservation de la roche et des minéraux de métamorphisme qui sont bien visibles à l'œil nu avec un score très élevé.
- ii) La capacité des géosites à illustrer les processus et structures métamorphiques dans le secteur d'étude.
- iii) L'importance de ces géosites comme références ou modèles explicatifs des faits liés au métamorphisme.
- iv) L'existence d'études scientifiques publiées sur le métamorphisme dans le secteur de Beni Bousera qui abrite ces géosites et dont leurs résultats reflètent leur VS.
- v) L'existence de différents types de roches métamorphiques (schistes, micaschistes, gneiss, kinzigites, péridotites, harzburgites, serpentinites, pyroxénites et dunites), leurs caractéristiques minéralogiques qui sont des marqueurs géodynamiques importants, témoignant des processus géodynamiques internes responsables de l'évolution de la chaîne rifaine dans sa relation avec la tectonique des plaques. De par leur importante géodiversité, les géosites de Beni Bousera présentent plusieurs intérêts scientifiques qui renfoncent le niveau plus élevé de leur VS.



Figure 14. Aspect des dunites sur la rive droite de l'Oued Sidi Yahya Aarab. Figure 14. Dunites aspect on the right side of the Oued Sidi Yahya Aarab.

N°	Nom de SIGeo	Int	Rpt	Rar	LC	CS	DG	RU	VS
1	Schistes de Tizgarine	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
2	Contact Ghomarides/Sebtides	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
3	Micaschistes de Targha	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
4	Gneiss de Stehat	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
5	Kinzigites de Chmaâla	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
6	Péridotite d'Aaraben	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
7	Harzburgite d'Aaraben	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
8	Serpentinites d'Aaraben	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
9	Pyroxénites d'Aaraben	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
10	Dunites d'Aaraben	0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
Moyenne pondérée		0,6	1,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,4	3,6
Pondération		15%	30%	15%	20%	5%	5%	10%	100%

Tableau 2. Evaluation des critères de la valeur scientifique et leur moyenne pondérée des géosites étudiés. *Table 2. Assessment of scientific value criteria and their weighted average of the studied geosites.*

Tableau 3. Evaluation des critères de la valeur éducative et leur moyenne pondérée pour chacun des SIGeos. *Table 3. Appreciation of educational value criteria and their weighted average for every SIGeos.*

N°	Nom de SIGeo	Vul	Acc	RU	Séc	Log	DP	AV	Pay	Uni	СО	PD	DG	PUE
1	Schistes de Tizgarine	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,9
2	Contact Ghomarides/Sebtides	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,9
3	Micaschistes de Targha	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,20	0,4	0,8	0,4	3,9
4	Gneiss de Stehat	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,15	0,4	0,8	0,4	3,8
5	Kinzigite de Chmaâla	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,15	0,4	0,8	0,4	3,8
6	Péridotite d'Aaraben	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,9
7	Harzburgite d'Aaraben	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,8
8	Serpentinites d'Aaraben	0,4	0,4	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,9
9	Pyroxénites d'Aaraben	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,8
10	Dunites d'Aaraben	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,15	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	0,4	3,8
Moyenne pondérée		0,40	0,37	0,20	0,30	0,20	0,15	0,20	0,20	0,18	0,40	0,80	0,40	3,8
Pondération		10%	10%	5%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	10%	20%	10%	100%

Valeur du potentiel d'utilité éducative (PUE)

La valeur du PUE reflète les relations et les effets du milieu extérieur, soit les aspects naturels et/ou culturels sur les géosites. Elle évalue les conditions d'observation par les étudiants, et la résistance des géosites à une éventuelle destruction causée par les visiteurs (vulnérabilité). Elle met en évidence aussi l'état des infrastructures (accessibilité, hébergement, restauration, réseau de communication et sécurité).

L'ensemble des valeurs de ces critères sont synthétisées dans le tableau d'évaluation de la valeur PUE ainsi que leur moyenne pondérée sont présentées ci-dessous (Tab.2).

D'après la discussion des critères de la valeur du potentiel d'utilisation éducative ci-dessus, et le calcul de la moyenne des PUE des géosites de la côte des Ghomara qui est de l'ordre de 3,8, on conclut que la valeur du PUE est très élevée. Cette valeur est expliquée par l'existence de la plupart des géosites à une distance courte des routes goudronnées et accessibles par tous les moyens de transport, l'inexistence des restrictions d'utilisation et l'association de tous ces géosites à des sites d'intérêt écologique, culturel ou autre qui donne une valeur additionnelle au géosite, ainsi que leur résistance à la destruction causée par les apprenants (vulnérabilité faible). La valeur du PUE est maintenue très élevée par la bonne condition d'observation et le bon état de conservation des roches.

Valeur du risque de dégradation

L'évaluation du risque de dégradation (RD) est basée sur cinq critères. Son importance réside dans le fait que les caractéristiques des éléments géologiques ont une forte probabilité d'être endommagés par des facteurs anthropiques ou naturels, lorsque le site n'est pas protégé par des lois juridiques, lorsqu'il est proche des zone de risques naturels (Mastere *et al.* 2020) et des activités potentiellement dégradantes. Le Tableau 4 présente les valeurs du risque de dégradation, les 5 critères et les moyennes pondérées de chacun des géosites de la zone d'étude.

La moyenne du risque de dégradation des géosites étudiés est modérée, de l'ordre de 2,4. On note que 67% de ces géosites ont un risque de dégradation modéré (Tab. 3), car les principales caractéristiques des éléments géologiques ont une probabilité d'être endommagées par des facteurs anthropiques ou naturels, et cela est dû au manque de contrôle d'accès même si la plupart des géosites bénéficient d'une protection juridique. A ce facteur s'ajoute la proximité de la majorité des sites de la zone d'étude aux routes et aménagements territoriaux inattendus. Au contraire, 33% des sites de la zone d'étude ont un RD faible (Tab. 4).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude des terrains métamorphiques des Sebtides le long de la côte des Ghomara nous a permis de retenir dix géosites pour l'illustration de ce métamorphisme. En tenant compte des valeurs calculées des critères de quantification adoptés, il est clair que ces géosites sont caractérisés par une valeur moyenne de la VS qui est très élevée (3,60) et dont les 10 sites ont obtenu une valeur très élevée qui dépasse 3,5, ce qui permet alors de les considérer comme géosites à valeur

Tableau 4. Evaluation des critères de la valeur du risque de dégradation des géosites étudiés et leur moyenne pondérée. *Table 4. Assessment of criteria of degradation risk value in the studied geosites and their weighted average.*

N° SIG	Nom de SIGeo	DG	PD	PJ	Acc	DP	RD
1	Schistes de Tizgarine	0,70	0,2	0,40	0,60	0,30	2,2
2	Contact Ghomarides/Sebtides	0,35	0,2	0,40	0,60	0,30	1,9
3	Micaschistes de Targha	0,70	0,8	0,40	0,60	0,30	2,8
4	Gneiss de Stehat	0,70	0,6	0,40	0,60	0,30	2,6
5	Kinzigites de Chmaâla	0,35	0,2	0,40	0,60	0,30	1,9
6	Péridotite d'Aaraben	0,35	0,2	0,40	0,60	0,30	1,9
7	Harzburgite d'Aaraben	0,70	0,8	0,40	0,60	0,30	2,8
8	Serpentinites d'Aaraben	0,70	0,8	0,40	0,60	0,30	2,8
9	Pyroxénites d'Aaraben	0,70	0,8	0,40	0,45	0,30	2,7
10	Dunites d'Aaraben	0,70	0,8	0,40	0,45	0,30	2,7
Moyenne pondérée		0,59	0,54	0,40	0,57	0,30	2,4
Pondération		35%	20%	20%	15%	10%	100%



Figure 15. Les arrêts de la géoroute de Beni Bousera sur l'image satellite de Google. *Figure 15. The stations of the Beni Bousera itinerary on the Google satellite image.* (https://fr.wikiloc.com/itineraires-voiture/georoute-pedagogique-du-metamorphisme-89901810)

patrimoniale. Les valeurs moyennes du PUE sont très élevées (3,8) et le risque de dégradation est modéré, de l'ordre de 2,4.

Par conséquent, ces géosites peuvent être valorisés en 10 arrêts (Fig. 15) dans un itinéraire pédagogique d'enseignement de la géologie (géoroute) et dont le thème est l'étude des roches et des processus métamorphiques caractéristique de la géologie régionale dans sa relation avec la géodynamique interne responsable de l'évolution structurale de la chaîne péri-plaque du Rif.

Cette géoroute est accessible et à infrastructures aptes à être utilisées dans le tracé d'un itinéraire pédagogique. Les caractéristiques de cette géoroute, telle qu'on l'a tracée, sont présentées dans le tableau suivant (Tab. 5).

Tableau 5. Caractéristiques techniques de la géoroute de Beni Bousera. *Table 5. Technical characteristics of the Beni Bousera georoute.*

Longueur	50,55Km				
Difficulté	Faible				
Altitude min	-1m				
Altitude max	237m				
Début	Village de Tizgarine				
Fin	Péridotites de Sidi Yahya Aârab				
Durée totale	4h30mn				
Durée de déplacement	1h04mn				

Dans le cadre de ce projet, notre groupe de travail tente à transformer les constituants des fiches d'identifications, de caractérisation et d'évaluations des sites en parties structurant le guide explicatif de l'itinéraire proposé (Aoulad Sidi Mhend *et al.* 2019). Ce guide proposera les lignes essentielles d'une démarche méthodologique de l'utilisation pédagogique et didactique des apprentissages des différents arrêts. Des scénarios pédagogiques avec les instructions nécessaires qui seront donnés comme mode d'exploitation et d'utilisation pour chaque arrêt.

Comme perspective de cette étude, la valorisation de ces 10 SIGeos sous forme d'une géoroute visant à mettre en évidence le métamorphisme observé dans la région, à améliorer les méthodes d'acquisition des connaissances qui lui sont liées et de matérialiser les faits géologiques aux étudiants/élèves et/ou enseignants stagiaires en passant des connaissances théoriques aux observations, mesures pratiques et échantillonnage sur le terrain.

Dans ce sens, la proposition de l'itinéraire accompagné d'un guide permettra à la fois aux étudiants universitaires, aux enseignants de SVT et aux élèves de la 2^{ème} année du baccalauréat de :

- Manipuler et observer directement les objets concrets tels que les différents types de roches métamorphiques ;
- Mieux faire comprendre les processus géologiques en illustrant des connaissances théoriques par des observations sur le terrain ;
- Surmonter la dimension temporelle et spatiale dans le processus de présentation des connaissances géologiques relatives au métamorphisme ;
- Développer des connaissances et des expériences pratiques pour les élèves et vérifier leurs acquis et connaissances ;
- Encourager et motiver les élèves à étudier les sciences de la Terre ;

- Aider les bénéficiaires (élèves, étudiants et enseignants stagiaires) à observer, dessiner des paysages, et rédiger des rapports;
- Inciter les apprenants et les former à travailler en groupe pour la recherche et la collecte des données géologiques du terrain.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement les rapporteurs du journal pour leurs précieux commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer la qualité de l'article, et l'éditeur pour ses efforts. Ils remercient également le Prof Younes Azaroual pour sa disponibilité, sa collaboration fructueuse et son implication dans les travaux de cet article.

REFERENCES

- Afiri A., Gueydan F., Pitra P. *et al.* 2011. Oligo-Miocene exhumation of the Beni-Bousera peridotite through a lithosphere-scale extensional shear zone. *Geodinamica Acta*, 24, 49–60.
- Alexandrowicz Z. & Kozlowski S. 1999. From selected geosites to geodiversity conservation-Polish example of modern framework. In: Barettino D, Vallejo M, Gallego E (Eds.) Towards the balanced management and conservation of the geological heritage in the new millenium. *Sociedad Geológica de España*, 40–44.
- Aghzer A.M. & Haissen F. 2005. High-pressure granulite event in the Filali Unit (Beni Bousera Massif, Morocco): implications for an early Variscan metamorphic evolution. *Geogaceta*, 38, 267–270.
- Arrad T.Y., Errami E. & Ennih N. 2018. From scientific inventory to socio-economic sustainable development: Tidzi Diapir geosite (Essaouira basin, Morocco). *Journal of Chemical, Biological* and Physical Sciences, 9(1), 1–17.
- Aoulad Sidi Mhend A. 2019. Caractérisation et valorisation du patrimoine géologique du Parc National de Talassemtane et de la côte des Ghomara (Rif septentrional, nord-ouest du Maroc).
 Doctorat National, Université IbnTofail, Faculté des Sciences de Kénitra, 306 p.
- Aoulad Sidi Mhend A., Maaté A. Amri I. *et al.* 2019. The Geological Heritage of the Talassemtane National Park and the Ghomara coast Natural Area (NW of Morocco). *Geoheritage*, 11(3), 1005–1025.
- Aoulad Sidi Mhend A., Maaté A., Hlila R. et al. 2020. A quantitative approach to geosites assessment of the Talassemtane National Park (NW of Morocco). Estudios Geológicos 76(1), 1–15.
- Benmarha O., Ammar A. & Mhammdi N. 2021. Répartition spatiale des sédiments dans le bassin Ouest-Alboran et sa marge marocaine. Bulletin de l'Institut Scientifique, Section Sciences de la Terre, 43, 1–13.
- Berger E.T. & Vannier M. 1984. Les dunites en enclaves dans les basaltes alcalins des îles océaniques : approche pétrologique. Bulletin de Minéralogie, 107(5), 649–663.
- Bouillin J.P., Durand-Delga M. & Olivier Ph. 1986. Betic-Rifain and Tyrrhenian arcs: Distinctive features genesis and development stages. In: Wezel. F. (Ed.). The origin of arcs. *Development in Geotectonics*, 221, pp. 281–304.
- Bouybaouene M.L. 1993. Etude pétrologique des métapelites des Sebtides supérieures. Rif interne. Maroc. Thèse Doct. Etat. Univ. Mohamed V., 160 p.
- Bouybaouene M.L., Goffé B. & Michard A. 1995. High pressure, low temperature metamorphism in the Sebtides nappes. Northern Rif. Morocco. *Geogaceta*, 17, 117–119.

- Bouybaouene M.L., Goffé B. & Michard A. 1998. Highpressure granulites on top of the Beni Bousera peridotites, Rif Belt, Morocco: a record of an ancient thickened crust in the Alboran domain. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 169, 153–162.
- Bouzekraoui H., Barakat A. & Touhami F. *et al.* 2017. Inventory and assessment of geomorphosite for geotoutism development : case study of ait Bou Oulli valley (central High-Atlas, Morocco). *Area*, 53(3), 331–343
- Brilha J. 2005. Património Geológico e Geoconservação: a Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica. *Palimage Editores*, 183 p.
- Brilha J. 2016. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites. *Geoheritage*, 8, 119–134.
- Chalouan A. 1986. Les nappes Ghomarides (Rif septentrional, Maroc). Un terrain varisque dans la chaîne alpine. PhD. Thesis, University Louis Pasteur, Strasbourg, 371 p.
- Chalouan A., Ouazani-Touhami A. & Mouhir L. *et al.* 1995. Les failles normales à faible pendage du Rif interne (Maroc) et leur effet sur l'amincissement crustal du domaine d'Alboran. *Geogaceta*, 17, 107–109.
- Chalouan A., Galindo-Zaldivar J. & Bargach K. *et al.* 2000. Deformaciones recientes en el frente de la Cordillera Rifeña (Prerif, Marruecos). *Geogaceta*, 29, 43–46.
- Chalouan A., Michard A. & Feinberg H. *et al.* 2001. The Rif mountain bulding (Morocco): a new tectonic scenario. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 172(5), 603–616.
- Chalouan A. & Michard A. 2004. The Alpine Rif Belt (Morocco): a case of mountain building in a subduction-subductiontransform fault triple junction. *Pure and Applied Geophysics*, 161, 489–519.
- Chalouan A., Michard A. & El Kadiri K. *et al.* 2008. The Rif belt, in Continental Evolution: The Geology of Morocco; Structure, Stratigraphy and Tectonics of the Africa–Atlantic– Mediterranean Triple Junction. In: Michard A., Saddiqi O., Chalouan A. *et al.* Lecture *Notes in Earth Sciences*, 116, 203–302 pp.
- Chalouan A., Michard A. & El Kadiri K. et al. 2011. Rif Central et Nord-Occidental central Rif oriental. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 560, 121 p.
- Chetouani K., Bodinier J.L. & Amri I. et al. 2015. Diversity of Pyroxenites in the Beni-Bousera massif: observations and geochemical relations. *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 579, 67–79.
- Chetouani K., Bodinier J.L. & Garrido C.J. *et al.* 2016. Spatial variability of pyroxenite layers in the Beni Bousera orogenic peridotite (Morocco) and implications for their origin. *Comptes Rendus Geoscience*, 348, 619–629.
- Chetouani K. 2016. Petrological and geochemical diversity of pyroxenites from Beni Bousera massif (Internal Rif, Morocco): implications for their origin. PhD. Thesis, Abdelmalek Essaâdi University of Tetouan. 212 p.
- Coratza P. & Giusti C. 2005. Methodological proposal for the assessment of scientific quality of geomorphosites. II Quaternario, Italien. *Journal of Quaternary Science*, 18(1), 307–313.
- De Lima F.F., Brilha J.B. & Salamuni E. 2010. Inventorying geological heritage in large territories: a methodological proposal applied to Brazil. *Geoheritage*, 2(3–4), 91–99.
- De Wever P., Le Nechet Y. & Cornée A. 2006. Vade-mecum pour l'inventaire du patrimoine géologique national. *Mémoire hors service Société géologique de France*, 12, 162 p.

- De Wever P., Egoroff G. & Cornée A. *et al.* 2014. Géopatrimoine en France. *Mémoire Hors-Séries de la Société Géologique de* France, 14, 180 p.
- Díaz-Martínez E. & Díez-Herrero A. 2011. Los elementos biológicos y culturales de interés geológico: un patrimonio a conservar. In Fernández-Martínez E. & Castaño de Luis R. (Eds.) Avances y retos en la conservación del Patrimonio Geológico en España. Actas de la IX Reunión Nacional de la Comisión de Patrimonio Geológico (Sociedad Geológica de España), Universidad de León, 85–90 pp.
- Durand-Delga M. & Kornprobst J. 1963. Esquisse géologique de la région de Ceuta (Maroc). *Compte Rendu Sommaire des Séances de la Société Géologique de France*, 7(7), 1049–1057.
- El Attrassi F., Brunet F. & Bouybaouene M. *et al.* 2011. Melting textures and microdiamonds preserved in graphite pseudomorphs from the Beni Bousera peridotite massif, Morocco. *European Journal of Mineralogy*, 23, 157–168.
- El Bakili 2021. Evolution tectono-metamorphique et chronologique des unités métamorphiques du Rif interne (Beni Bousera, Nord du Maroc). Doctorat en Sciences de la Planète. Univers d'Université Côte d'Azur et de l'Université Mohammed V, 389 p.
- El Maz A. & Guiraud F. 2001. Example of low-variance paragenèses in the metapelite of Filali (inner Rif, Morocco): Description, interpretation and geodynamic implication. *Bulletin de la Société Géologique de France*, *172*, 469–485.
- Farah A., Michard A. & Saddiqi O. *et al.* 2021. Early exhumation of the Beni Bousera granulites and peridotites at the northern margin of the westernmost Tethys (Rif belt, Morocco); new constraints from overlying marbles. *EGU General Assembly Abstracts* 2021, pp. EGU21-581
- Frets E., Tommasi A. & Garrido C.J. et al. 2012. Deformation processes and rheology of pyroxénites under lithospheric mantle conditions. *Journal of Structural Geology*, 39, 138–15.
- Frets E., Tommasi A. & Garrido C.J. *et al.* 2014. The Beni Bousera Peridotite (Rif Belt, Morocco): an oblique-slip low-angle shear zone thinning the subcontinental mantle lithosphere. *Journal of Petrology*, 55, 283–313.
- Fuertes-Gutiérrez I. & Fernández-Martínez E. 2010. Geosites inventory in the Leon Province (Northwestern Spain): a tool to introduce geoheritage into regional environmental management. *Geoheritage*, 2(1–2), 57–75.
- Fuertes-Gutiérrez I. & Fernández-Martínez E. 2012. Mapping Geosites for Geoheritage Management: A Methodological Proposal for the Regional Park of Picos de Europa (León, Spain). *Environmental Management*, 50, 789–806.
- García-Cortés A. & Carcavilla Urquí L. 2009. Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG), version 12. *Instituto Geológico y Minero de España*, Madrid, 64 p.
- Grandgirard V. 1999. Inventaire des géotopes d'importance nationale. *Geologia Insubrica*, 4(1), 25–53.
- Gray J.M. 2013. Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature, 2nd édition. John Wiley & Sons, Chichester.
- Guerrera F., Martin-Algarra A. & Perrone V. 1993. Late Oligocene-Miocene syn-/-late-orogenic successions in Western and Central Mediterranean Chains from the Betic Cordillera to the Southern Apennines. *Terra nova*, 5, 525–544.
- Gysi A.P., Jagoutz O. & Shmidt M.W. *et al.* 2011. Petrogenesis of Pyroxenites and melt infiltrations in the ultramafic complex of Beni Bousera, Northern Morocco. *Journal of Petrology*, 52, 1679–1735.

- Hajjar Z., Wafik A. & Constantin M. et al. 2016. Process of serpentinization in the ultramafic massif of Beni Bousera (internal Rif, Morocco). Arabian Journal of Geosciences, 9, 1–9.
- Hajjar Z. 2016. Métallogénie des minéralisations à Cr-Ni-EGP et serpentinisation des péridotites du massif de Beni Bousera (Rif interne, Maroc). Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech, 310 p.
- Henriques M.H., Pena dos Reis R. & Brilha J. *et al.* 2011. Geoconservation as an emerging geoscience. *Geoheritage*, 3(2), 117–128.
- Honsberger I.W. & Laird J. 2018. Net-transfer reactions and modal spaces for ultramafic slivers, Vermont Appalachians, USA. *Canadian Mineralogist*, 56(5), 821–846.
- Homonnay E. 2019. Evolution tectono-métamorphique et chronologie de mise en place des unités métamorphiques du Rif interne (Maroc). Thèse de Doctorat, Université Côte d'Azur, 305 p.
- JNCC Joint Nature Conservation Committee 1977. Guidelines for selection of Earth Science SSSIs.
- Kornprobst J. 1969. Le massif ultrabasique des Beni Bousera (Rif Interne, Maroc) : Etude des péridotites de haute température et de haute pression, et des pyroxénolites à grenat ou sans grenat, qui leur sont associées. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 23, 283–322.
- Kornprobst J. 1974. Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional). *Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc*, 251, 226 p.
- Kornprobst J., Wildi W., & Uttinger J. et al. 1975. Carte géologique du Rif. Talambote 1/50.000, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n° 290.
- Kornprobst J., Wildi W., & Uttinger J. et al. 1975. Carte géologique du Rif. Bou Ahmed 1/50.000, Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n°289.
- Kornprobst J., Piboule M., & Roden M. *et al.* 1990. Corundumbearing garnet clinopyroxénites at Beni Bousera (Morocco) : Original plagioclase-rich gabbros recrystallized at depth within the mantle? *Journal of Petrology*, 31, 717–745.
- Lapo A.V., Davydov V.I., Pashkevich N.G. et al. 1993. Methodic principles of study of geological monuments of nature in Russia. *Stratigraphy and Geological Correlations*, I(6), 636–644.
- Marcaillou C. 2011. Serpentinisation et production d'hydrogène en contexte de dorsale lente : approche expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 298 p.
- Mastere M., El Fellah B. & Maquaire O. 2020. Landslides inventory map as a first step for hazard and risk assessment: Rif mountains, Morocco. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre*, 42, 49–62.
- Mehdioui S., El Hadi H. & Tahiri A. *et al.* 2020. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites in Rabat-Tiflet Region (North Western Morocco): Preliminary Study to Evaluate the Potential of the Area to Become a Geopark. *Geoheritage*, 12(2), 1–17.

- Mellini M. 1982. The crystal structure of lizardite 1T; hydrogen bonds et polytypism. *American Mineralogist*, 67(5–6), 587–598.
- Montel J.M., Kornprobst J. & Vielzeuf D. 2000. Preservation of old U-Th-Pb ages in shielded monazites: example from the Beni-Bousera Hercynian kinzigites (Morocco). *Journal of Metamorphic Geology*, 18, 335–342.
- Michard A., Goffé B., & Bouybaouene L. *et al.* 1997. Hercynian Mesozoic thinning in the Alboran Domain. Metamorphic data from the northern Rif, Morocco. *Terrra Nova*, 9, 171–174.
- Michard A., Negro F. & Saddiqi O. *et al.* 2006. Pressure-temperaturetime constraints on the Maghrebide mountain building: Evidence from the Rif-Betic transect (Morocco, Spain), Algerian correlations, and geodynamic implications. *Comptes Rendus Geoscience*, 338, 92–114.
- Michard A., Sadiqi O., & Chalouan A. 2008. Continental Evolution: The Geology of Morocco. Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction. Advances in geographic information science. *Springer*, 438 p.
- Milliard Y. 1959. Les massifs métamorphiques et ultrabasiques de la zone paléozoïque interne du Rif. *Notes et Mémoires du service Géologique*, 147, 125–155.
- Mirari S., Aoulad Sidi Mhend A. & Benmlih A. 2020. Geosites for Geotourism, Geoheritage, and Geoconservation of the Khnefiss National Park, Southern Morocco. *Sustainability*, 12(17), p. 7109.
- Nold M., Uttinger J. & Wildi W. 1981. Géologie de la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif interne, Maroc). Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 300, 233 p.
- Negro F., Beyssac O. & Goffé B. *et al.* 2006. Thermal structure of the Alboran Domain in the Rif (northern Morocco) and the Western Betics (southern Spain). Constraints from Raman spectroscopy of carbonaceous material. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(4), 309–327.
- O'Hanley D. 1996. Serpentinites: records of tectonic et petrological history. Oxford University Press, 277 p.
- Parkes M.A. & Morris J.H. 1999. The Irish Geological Heritage Programme. In: Barettino D., Vallejo M. & Gallego E. (Eds.) Towards the balanced management and conservation of the geological heritage in the new millenium. Spain, *Sociedad Geológica de España*, 60–64 pp.
- Pearson D.G., Davies G.R., Nixon P.H. *et al.* 1989. Graphitized diamonds from a peridotite massif in Morocco and implications for anomalous diamond occurrences. *Nature*, 338, 60–62.
- Pearson D.G., Davies G.R. & Nixon P.H. 1993. Geochimical constraints on the petrogenesis of diamonds facies pyroxenites from Beni Bousera peridotite massif, North Morocco: derivation from subducted oceanic lithosphere. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 102, 289–301.
- Pralong J.P. & Reynard E. 2005. A proposal for the classification of geomorphological sites depending on their tourist value. *Quaternario*, 18 (1), 315–32.

- Raimbourg H. 2005. Mécanismes d'éclogitisation et conséquences mécaniques pour l'exhumation des roches métamorphiques de haute pression. Géologie appliquée. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- Reynard E., Fontana G. & Kozlik L. *et al.* 2007. A method for assessing scientific and additional values of geomorphosites. Geographica Helvetica. *Geographica Helvetica*, 62(3), 148–158.
- Reynard E. & Coratza P. 2013. Scientific research on geomorphosites. A review of the activities of the IAG working group on geomorphosites over the last twelve years. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 36, 159–168.
- Reynard E., Perret A. & Bussard J. *et al.* 2016. Integrated Approach for the Inventory and Management of Geomorphological Heritage at the Regional Scale. *Geoheritage*, 8, 43–60.
- Romagny A. 2011. Evolution de la surrection de la chaine du Rif (Maroc). Mémoire de stage. Master 2 Dynamique des systèmes géologiques et alias. Université de Nice Sophia Antipolis, 54 p.
- Romagny A. 2014. Evolution des mouvements verticaux néogènes de la chaîne du Rif (Nord- Maroc) : apports d'une analyse

structurale et thermo-chronologique. Sciences de la Terre, Université Nice Sophia Antipolis, 272 p.

- Saddiqi O. 1995. Exhumation des roches profondes, péridotites et roches métamorphiques HP-BT dans deux transects de la chaine alpine : Arc de Gibraltar et Montagnes d'Oman. Thèse de Doctorat d'Etat, Universite Hassan II, Casablanca.
- Suter G. 1980. Carte géologique du Rif, 1/500.000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, n°245a.
- Vidal O., Goffé B. & Bousquet R. *et al.* 1999. Calibration and testing of an empirical chloritoid-chlorite thermometer and thermodynamic data for daphnite. *Journal of Metamorphic Geology*, 10, 603–614.
- Wimbledon W.A., Benton M.J. & Bevins R.E. *et al.* 1995. The development of a methodology for the selection of British Geological sites for geoconservation: part 1. *Modern Geology*, 20, 159–202.
- Wimbledon W.A. 2011. Geosites: A mechanism for protection, integrating national and international valuation of heritage sites. *Geologia dell'Ambiente, supplement*, 2, 13–25.

Manuscrit reçu le 15/07/2021 Version révisée acceptée le 15/11/2022 Version inale reçue le 21/11/2022 Mise en ligne le 25/11/2022