

Le sultanat d'Oman: un territoire d'exception pour l'étude de la tectonique des plaques et la géomorphologie

The Sultanate of Oman: an exceptional territory for the study of plate tectonics and geomorphology

Jean-Noël Salomon

Professeur Emérite de l'Université Michel de Montaigne de Bordeaux
jnsalomon@yahoo.com

Artigo recebido a 25 de março de 2021 e aprovado a 26 de abril de 2021

Résumé

La pointe Nord-est de la plaque arabique, et plus précisément le Sultanat d'Oman, s'avère être un territoire d'exception pour comprendre les questions géologiques et géomorphologiques qui se posent aux scientifiques. Que ce soient les problèmes de la tectonique des plaques, des orogénèses (lithologie, structure, tectonique) ou des morphologies de surface (érosion fluviale, éolienne, littorale, karstogénèse, etc.) les parcours dans les montagnes d'Oman, ses canyons ou ses déserts se révèlent très instructifs. Parmi les intérêts principaux on soulignera la présence du plus vaste plancher océanique exondé au monde (site de Sémail), l'incision en canyons des terrains soulevés, un important karst méconnu et des déserts exceptionnels. Ces circonstances particulières ont également fait d'Oman un lieu de gisement miniers de métaux rares et d'hydrocarbures à la base d'une occupation humaine très ancienne et, avec le tourisme, de sa richesse actuelle.

Mots-clés: Oman, tectonique des plaques, plancher ophiolitique, orogénèse, ravinement, karstogénèse, désert, littoral, tourisme nature.

Summary

The northeastern tip of the Arabian Plate and more precisely the Sultanate of Oman is proving to be an exceptional territory for understanding the geological and geomorphological questions facing scientists. Whether it is the problems of plate tectonics, orogenesis (lithology, structure, tectonics) or surface morphologies (fluvial, wind, coastal erosion, karstogenesis, etc.), routes in the mountains of Oman, its canyons or its deserts are very instructive. Among the main interests we will highlight the presence of the largest exposed ocean floor in the world (Sémail site), the incision in canyons of the raised terrain, an important little-known karst and exceptional deserts. These special circumstances have also made Oman a place of mineral deposits of rare metals and hydrocarbons, the basis of a very ancient human occupation and, with tourism, of its present wealth.

Keywords: Oman, plate tectonics, ophiolitic floor, orogeny, gullying, karstogenesis, desert, coastline, nature tourism.

1. Introduction

Le Sultanat d'Oman recèle des trésors géologiques majeurs notamment en raison de la présence d'ophiolites en surface (roches provenant du plancher océanique). Certes il existe d'autres pays où l'on observe ces fragments de lithosphère océanique préservés à terre, et reposant sur de la lithosphère continentale (Figure 1). De fait on a répertorié environ 150 secteurs d'ophiolites¹ (roches appartenant à une

portion de lithosphère océanique, charriée par obduction) reposant sur la croûte continentale à travers le monde (Troodos de Chypre (Photo 1), Dilek & Harald, 2011)² - zone de Dunnage (Appalaches du Québec- De Souza, Tremblay, Ruffet, & Plinet (2011) - Précordillère de Mendoza en Argentine - Cingolani, 1970, etc.)³. Or il s'agit de vestiges d'océans disparus.

² Troodos de Chypre. Le massif se compose essentiellement d'ophiolites (basaltes et roches vertes ultrabasiques - serpentines et gabbros -, témoins de croûte océanique). Le Parc national forestier du Troodos a acquis une importance mondiale pour les géologues car cela permet d'étudier, à pied sec, la formation de la croûte océanique il y a 90 Ma, entre 6 000 m et 2 000 m de profondeur. Les ophiolites de Chypre sont célèbres pour leur minéralisation en cuivre, en relation avec le nom de l'île (*kupros* = cuivre en grec).

³ Les ceintures ophiolitiques dans la région pré-andine du centre de l'Argentine ont été interprétées comme des sutures possibles d'un collage de terrains accrochés à la marge proto-andine du Gondwana au Paléozoïque inférieur. Les ceintures ophiolitiques de la Précordillère ont été

¹ Les ophiolites sont des roches vertes ultrabasiques (harzburgites, péridotites de la Nappe de Sémail) formées en profondeur océanique. Ces roches appartiennent à une portion de lithosphère océanique, charriée par obduction. L'intérêt paléogéographique des ophiolites est qu'elles indiquent la présence d'océans fossiles et permettent d'identifier les zones de suture. L'âge de leur formation permet de dire quand l'accrétion était active et le paléomagnétisme permet de dire où était localisé l'océan en cours de formation.

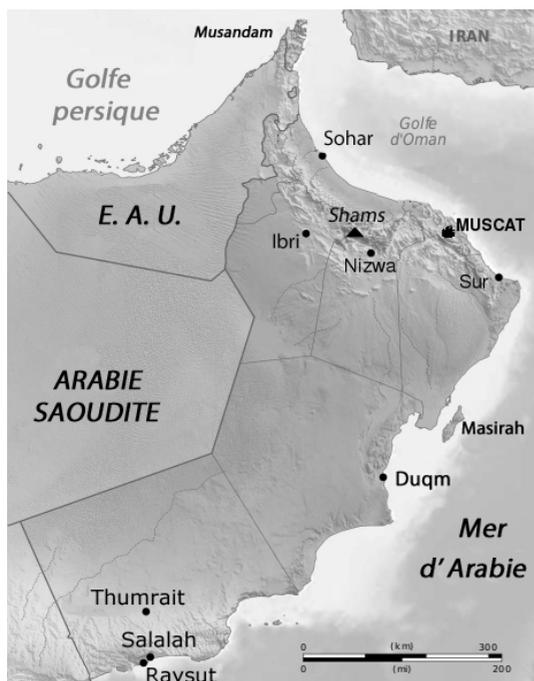


Figure 1
Situation du Sultanat d'Oman.

A Oman on a la chance d'avoir affaire à une ophiolite bien conservée et peu déformée. C'est en effet le seul pays au monde dont la surface est en grande partie constituée de roches provenant du plancher océanique. Le matériel est venu s'échouer, il y a environ 90 Ma, sur le continent, lors d'une collision avec une plaque océanique lithosphérique. Oman constitue aujourd'hui un véritable musée à ciel ouvert pour les géologues. Cela permet également de comprendre comment, de façon paradoxale, la lithosphère océanique plus lourde (environ 3.3 de densité) a pu passer sur la lithosphère continentale plus légère (densité 2.7). Mais la variété des roches et des reliefs recèle bien d'autres morphologies exceptionnellement intéressantes, notamment dans les montagnes et le littoral.

décrites dès 1963. Sur le versant ouest de la Précordillère le complexe ophiolitique, mis en place dès le début du Paléozoïque, s'étend sur 900 km. Cette bande est représentée par une série d'expositions discontinues de roches mafiques et ultramafiques préservées dans le faciès du versant ouest de la plate-forme carbonatée de la Précordillère. Les basaltes sont des tholéiites océaniques évoluées, formées dans un environnement tectonique similaire et indiquent une dorsale océanique à un stade précoce de développement avec des ophiolites mises en place le long d'une zone de suture entre le Chili et la Précordillère.

2. La genèse des montagnes d'Oman à travers l'exemple de l'Hajar

Le sultanat d'Oman est parcouru du Nord au Sud par une importante chaîne de montagnes qui s'étire en croissant sur quelques 700 km. Celle-ci est bordée à l'Ouest par les plaines du Rub el Kliali et à l'Est par la plaine côtière de la Batinah. La chaîne omanaise appartient à la branche orientale du système méditerranéo-alpin. Celui-ci est né du rapprochement entre les blocs eurasiatique et arabo-africain organisés autour d'un océan téthysien. Cet océan fonctionna dès le Trias pour se clore au Crétacé supérieur. Une ceinture de massifs ophiolitiques, reliques de la croûte océanique soulevée, jalonne cette suture. Le dôme Jabal Akhdar est situé dans la partie centrale des montagnes d'Oman lesquelles sont situées à l'angle nord-est de la plaque d'Arabie. La chaîne est d'environ 100 km de large, le Jabal Shams, en région centrale, étant le plus haut sommet (3009 m).

Ces montagnes ont été formées au cours de plusieurs événements tectoniques: la subduction dirigée vers le nord-est de l'Arabie et un soulèvement consécutif du dôme, marqué par des réseaux complexes de fractures et de veines dans les carbonates. L'ensemble est un parfait exemple d'ouverture de fracture dynamique et de scellement d'un système fortement compressé. La zone a subi plusieurs de ces événements tectoniques au cours du Crétacé supérieur et du Cénozoïque (obduction des nappes d'ophiolites suivie d'un soulèvement et d'une compression).

2.1. La formation

Les plaques tectoniques de la Terre sont constituées à la fois d'une croûte continentale légère et d'une croûte océanique épaisse. La croûte océanique est plus lourde car elle contient des matériaux du manteau solidifiés riches en ions de métaux lourds tels que le fer et le magnésium. Il arrive que deux plaques crustales sous la mer se séparent et que le magma fondu sous-jacent s'élève dans l'espace libéré et à mesure que la lave, en refroidissant, se solidifie. Les différents minéraux cristallisent dans une séquence qui produit une stratification distincte dans la croûte océanique solide finale. Là où les laves se brisent en perçant la croûte, elles s'étalent sur le fond de la mer, se refroidissant rapidement pour se



Photo 1
Bancs d'ophiolites au Mont Troddos (Chypre).

figer en des formes caractéristiques en coussinets avec une surface extérieure plus lisse, appelées pillow-lavas.

Normalement, lorsque deux plaques avec des croûtes différentes convergent, la croûte la plus légère est poussée vers le haut, forçant la croûte la plus dense vers le bas dans le manteau chaud pour y être refondue. Cependant, en de rares occasions, comme à Oman, la lourde croûte océanique peut être poussée vers le haut, sur un morceau de croûte continentale, la laissant exposée et accessible au lieu d'être enfouie à des kilomètres au fond de l'océan.

La surrection des montagnes d'Oman à une époque géologique relativement récente n'a pas été causée par un seul mouvement tectonique. Les ouvertures de la croûte terrestre qui ont créé le golfe de Suez et la Mer Rouge y ont toutes deux contribué, avec une poussée de la plaque continentale arabe vers l'Asie. Cela a engendré des montagnes non seulement à Oman, mais aussi à travers la Turquie et l'Iran, ce qui pose des problèmes continuels

avec des tremblements de terre, et enfonce la péninsule de Musandam de plusieurs centimètres chaque année, en inondant les vallées littorales.

Par la suite, l'érosion et le climat désertique d'Oman ont également raboté la plaque de croûte océanique pour révéler les parties internes de l'ophiolite, mettant ainsi à jour le fragment de croûte océanique le plus grand et le mieux exposé au monde.

Actuellement, la plaque d'Arabie continue de se déplacer vers le nord par rapport à la plaque d'Eurasie, à raison de 2 à 3 cm/an. La collision continentale est ancienne et se produit au niveau du pli des Zagros et de la zone de poussée à l'ouest de Musandam. Cette frontière de collision se transforme en une zone de subduction, vers l'est. Ici, la croûte océanique de la plaque d'Arabie s'enfonce vers le nord sous l'Eurasie (subduction de Makran).

La géologie du Hajar peut être regroupée en 4 grands groupes tectono-stratigraphiques:

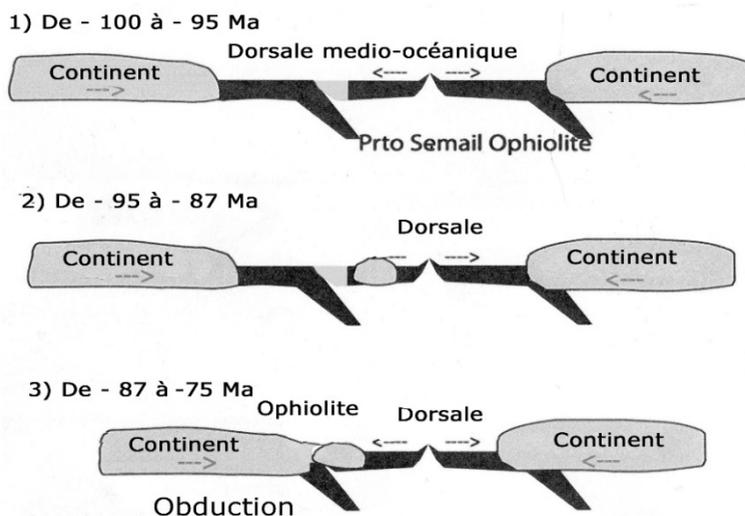


Figure 2
Mécanisme de l'obduction.

- le premier est constitué des roches du socle pré-permien, d'une séquence sédimentaire de clastes, de carbonates et d'évaporites.
- le second est une séquence carbonatée du plateau continental du Permien moyen au Crétacé supérieur, déposée en discordance au-dessus du socle.
- le troisième est une série de nappes de débris qui ont été transportées horizontalement du nord-est au sud-ouest sur plus de 300 km. Ce fut un événement tectonique majeur au cours du Crétacé supérieur. Cette obduction, où les roches sédimentaires du Permien au Crétacé continental (montée peu profonde à profonde) et la croûte océanique du Crétacé supérieur (Semail) ont été poussées au-dessus des roches des groupes un et deux (Figure 2).
- enfin, le groupe quatre est constitué de roches sédimentaires marines et terrestres peu profondes du Crétacé au Miocène, déposées au-dessus des trois groupes précédents.

Les forces motrices qui ont formé le Hajar sont toujours débattues. De nombreux géologues attribuent la collision du Zagros comme étant à l'origine du soulèvement car on pense que la péninsule de Musandam fut édiflée en raison de cette collision. Cependant, Jabal Shams, est à plus de 300 km de

cette zone. De plus, on n'y observe pas de sismicité majeure ce qui indique que les montagnes ne se déforment pas beaucoup. Cela indique que le soulèvement qui a créé la topographie actuelle est assez ancien.

A partir des observations des géologues il est possible de proposer le scénario suivant.

1. Entre le Permien (de - 298 à - 252 Ma) et le Trias (de - 252 à - 201 Ma) s'initie un épisode d'extension de la croûte continentale suivi d'un amincissement de cette dernière (distension). L'apparition d'un rift annonce l'ouverture d'un futur océan au-Nord-est de la plaque d'Arabie ; l'amincissement amorce l'ouverture d'un océan du N-E de la plaque arabe.
2. Au Jurassique (de - 201.3 à - 145 Ma), l'Océan Téthys apparaît entre l'Iran et Oman et une jeune dorsale médio-océanique apparaît par accréation. A la fin du Jurassique l'Océan s'est agrandi.
3. Au cours du Crétacé (de - 145 à - 65 Ma) de l'extension océanique favorise une sédimentation d'eau profonde (série de Hawasina: cherts à radiolarites et boues fines de la plaine abyssale); tandis que des courants de turbidité déversent sur la pente continentale des matériaux d'origine terrestre. Des récifs coraliens préparent de futurs calcaires récifaux

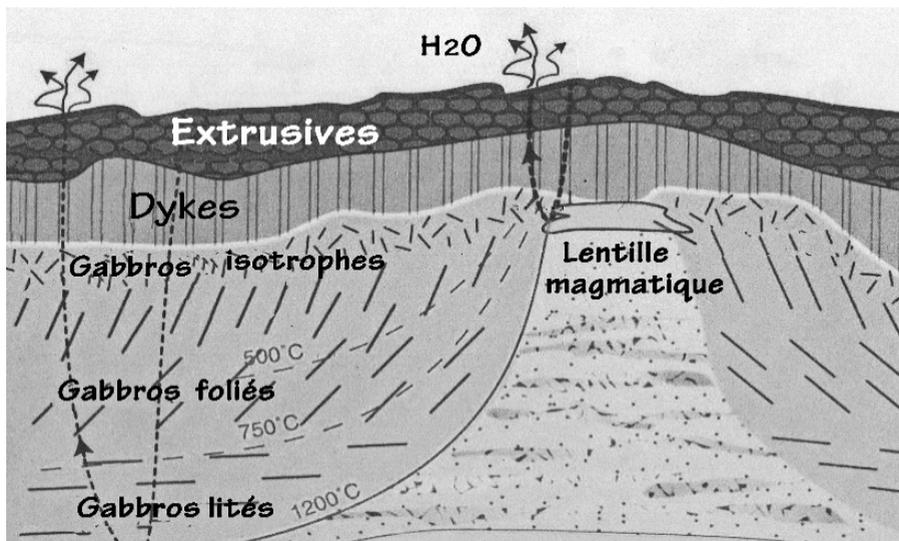


Figure 3
Formation des ophiolites.

une fois exhumés (ex: calcaires de Mahbab dans le Wadi Bani Ghafir). Quelques fumeurs noirs traduisent une grande activité volcanique (Zuha, Wadi Salahi). Sur les plateformes en eau peu profonde de nombreux fossiles (bivalves) se déposent.

4. Du Crétacé moyen au Crétacé supérieur (vers - 95 Ma) intervient une phase de compression avec subduction entre la plaque Afro-arabe et la dorsale médio-océanique. Le chevauchement forme un prisme d'accrétion, constitué de sédiments profonds (futurs nappes de Hawasina et de Sumeini). A la fin du Crétacé, la croûte océanique est charriée sur la plate-forme de la marge passive qui s'effondre car il y a avortement de la subduction et obduction. Le raclage pousse devant lui un prisme de sédiments profonds tout en provoquant un échauffement entre la croûte; c'est l'origine d'une semelle métamorphique à la base de la série ophiolitique (Fanjah). Ce magma qui s'est refroidi au fond de l'océan offre aujourd'hui aux visiteurs des formations étonnantes et une remontée dans le temps de quelques millions d'années. Cette mise en place sur la plate-forme continentale s'est accompagnée d'infiltrations de flux hydrothermiques altérant profondément la croûte océanique (Fig. 2). Il en résulte la formation de serpentine, visible (blanc-verdâtre) dans le Wadi Al

Abyad. C'est de cette serpentinisation qu'est né le terme d'"ophiolite" qui signifie "roche serpentine". Enfin, un ressaut isostatique (soulèvement) achève de séparer définitivement des lambeaux de la croûte océanique et provoque des glissements gravitaires (érosion);

5. Au Tertiaire (Oligocène - de 33 à 23 Ma - et plus nettement au Miocène - 17 Ma) la tectonique des plaques a entraîné le détachement de la plaque Arabe de celle de l'Afrique par la progression du rift de Sheba, puis une ouverture océanique dans le golfe d'Aden jusqu'au nord de la Mer Rouge. C'est un des très rares exemples au monde de rifting oblique dont les conséquences sont, par distension au sud, le soulèvement du Dhofar et, par compression au nord, l'érection de la chaîne du Hajar. La région continue à se soulever et les agents érosifs retouchent.

6. L'obduction du Crétacé tardif a créé des montagnes proto-Hajar. Cependant, cette topographie s'est affaïssée et une sédimentation marine peu profonde a recouvert la région à partir du Paléocène. Aujourd'hui, dans le Hajar, ces roches sédimentaires du Paléocène à Éocène se trouvent à 2 200 m au-dessus du niveau de la mer et sont plissées. Cela indique que la topographie actuelle s'est formée après la fin de l'Éocène.

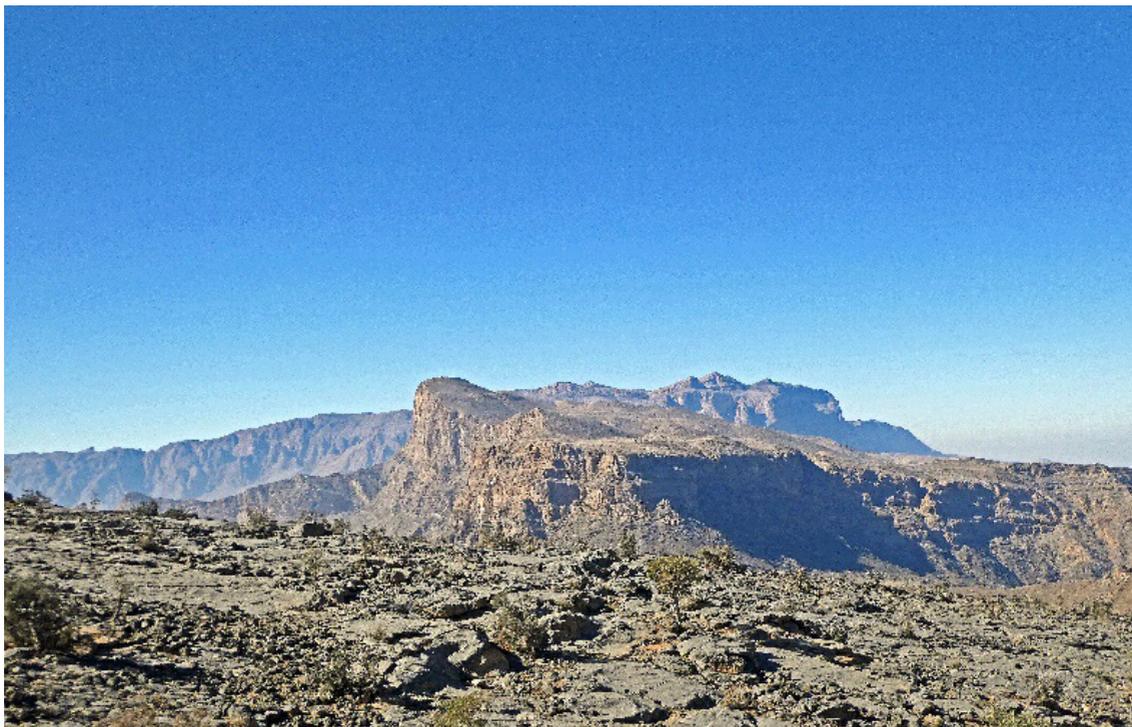


Photo 2
Pic de 1000 m et plancher ophiolitique, surélevé.

La topographie sommitale s'ordonne autour de deux points culminants majeurs: Jabal Akhdar et Saih Hatat, qui sont des anticlinaux à grande échelle. L'aboutissement de Saih Hatat contient des roches métamorphiques (éclogites) formées sous conditions de forte pression et température dans le manteau (environ 80 km de profondeur), puis exhumées à la surface. Cette exhumation a créé peut-être le plus grand plissement de structure sur Terre, le pli de Wadi Mayh. Les deux points culminants sont séparés par le Semail Gap. Il s'agit d'une structure linéaire proéminente, de direction NNE-SSW. La nature de cette structure fait encore débat: faille latérale senestre, faille normale, rampe latérale, monoclinale due à une poussée aveugle, ou d'une faille avec plusieurs phases de déformation? Le site de Semail vient illustrer de façon exceptionnelle ce qui précède car il est facilement accessible et très pédagogique: les géologues qui ont étudié la région, ont essayé de trouver le meilleur modèle explicatif de sa formation (Hacker, 1991). Il s'agit d'une grande dalle de croûte océanique (roches volcaniques et ultramafiques du manteau supérieur) qui a été renversée sur la croûte continentale sous forme d'ophiolite (Figure 3; Photo 2). Les affleurements sont situés sur le secteur

oriental de la péninsule arabique et couvrent environ 100 000 km². Le Semail ophiolitique d'Oman s'est formé au Crétacé supérieur (datation uranium-plomb) et il est principalement constitué de roches silicatées (teneur en SiO₂ allant de 45 à 77 % en poids). L'ophiolite de Semail est également importante parce qu'elle est riche en gisements de cuivre et de chromite, et surtout parce qu'elle fournit également des informa-

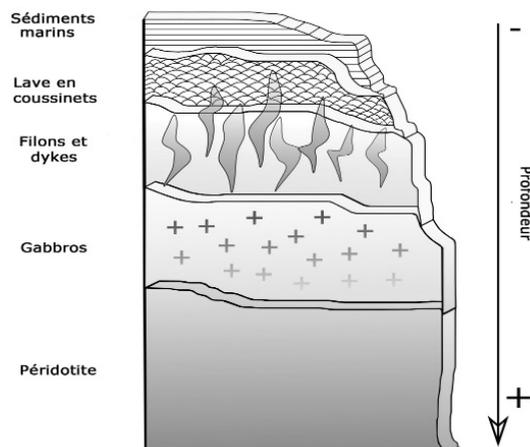


Figure 4
Séquence ophiolitique.



Photo 3
Lave en coussinets (pillow-lavas) - Wadi Jizz.

tions précieuses sur le fond océanique et le manteau supérieur sur terre.

La séquence type (très simplifiée) semble être, de haut en bas, la suivante: sous des radiolarites (sédiments siliceux formés par les squelettes de radiolaires, organismes du plancton marin), on rencontre des basaltes en coussinets (pillow-lava) surmontant un complexe filonien (dykes basaltiques), ensuite des gabbros, puis des péridotites et enfin des serpentines issues de l'altération des mêmes péridotites (Figure 4). On trouve souvent, à la base d'une séquence ophiolitique charriée sur une marge continentale (Photo 3) une "semelle" de roches métamorphiques dont l'épaisseur peut atteindre 300 m. Ces roches sont issues de basaltes et de sédiments rabotés et métamorphisés par la nappe ophiolitique encore chaude au cours de son charriage.

Mais la variété des roches et des reliefs recèle bien d'autres morphologies exceptionnellement intéressantes, notamment dans les montagnes et sur le littoral.

3. Les ravins, les gorges et les canyons (waddis)

Ils sont très nombreux et souvent spectaculaires (profondeur et étroiture). Cela s'explique par deux facteurs.

Le premier est la rapidité et vigueur de la surrection provoquée par la subduction ayant généré des reliefs d'altitude élevée: Jabal Mitsi (2 980 m) et le Jabal Akhdar (3 009 m) culminent dans les monts Hajar et au sud du pays, les monts du Dhofar s'élèvent à plus de 2 500 m (Jabal Akhar).

Le deuxième est la quantité de pluies qui s'abat au cours de la mousson. En Oman le climat est presque partout tropical désertique, avec quelques pluies en été dans les hauteurs du nord et du sud, et quelques bancs de nuages apportés par la mousson d'été le long de la côte orientale. La mousson, de la mi-juin à la mi-septembre, souffle vers le continent asiatique, apportant un effet limité en matière de pluie, mais en altitude le total pluviométrique dépasse souvent les 300 mm car les montagnes font obstacle (effet orographique). De plus, Oman peut être affecté par les cyclones tropicaux, qui apportent des vents violents et des pluies torrentielles, comme



Photo 4
Massif du Hajar et ses profonds canyons.

cela est arrivé avec les cyclones Gonu en juin 2007 ($P > 700$ mm) ou Mekunu ($P > 600$ mm) en mai 2018. Les eaux de ruissellement sont rapidement concentrées dans les bassins versants pentus et très chargées en débris abrasifs (forte érosion; encaissements > 300 m). Les débits de pointe ne sont pas connus. Sur le littoral, le total pluviométrique annuel est généralement inférieur à 40 mm (déserts).

La barrière naturelle formée par le massif du Hajar est sillonnée par de profondes vallées, souvent parcourues de cours d'eau temporaires - les waddis - (oueds) façonnés en ravins ou même en de véritables canyons (Photo 4).

Parmi les principaux, citons du nord au sud:

- le Waddi Al Jizzi qui relie la côte d'Al Batinah à Al Buraymi. C'est l'un des plus anciens passages qui relie le nord des montagnes d'Oman, connu comme site minier d'extraction de cuivre (le pays de Magan était le principal centre d'extraction de ce métal que l'on exportait déjà vers la Mésopotamie il y a 3 000 ans av. J.-C.). Ce site (calcaires fossilifères

marins tertiaires) revêt une grande importance pour notre compréhension des technologies de subsistance passées, l'émergence et le développement de l'exploitation minière et de la métallurgie. Les laves en coussinet (datées de 95 Ma) se situent à moins de 35 km de la route Sohar-Al Buraymi.

- le Waddi Al Abyadh (= *vallée blanche*), est un oued creusé dans la roche situé à Nakhal, dans la région sud d'Al Batinah. Le nom de l'oued fait référence à la couleur blanche de ses bassins d'eau, ce qui est probablement dû aux roches carbonatées de la région. De nombreuses plantes et palmiers des deux côtés l'oued, en font un endroit agréable pour une randonnée facile (sentier) car il s'agit principalement de gravier et de rochers. Wadi Al Abyad montre de nombreuses ophiolites.
- Waddi Nakhr est la partie amont du Grand Canyon d'Arabie du Jabal Shams. Extrêmement encaissé, il change de nom vers l'aval au sud,



Photo 5
Canyon du Waddi Ghul.

et devient Waddi Ghul (Photo 5) lequel débouche sur une vallée cultivée au niveau du hameau de Ghul. Outre la coupe stratigraphique, les vues panoramiques sont superbes. Le Snake Canyon, étroit et escarpé, très apprécié des touristes, est situé dans le Waddi Bani Awf qui débouche dans le Grand Canyon.

- Dans la région d'Al Sharkiyah, Waddi Shab est une attraction en plein air, très prisée. Il y coule un magnifique oued avec des bassins naturels (baignade) et des chutes d'eau. Les parois gréseuses présentent des encoches d'érosion et se distinguent nettement des strates de calcaires. On peut y apprécier les différences de lithologie des blocs éboulés. Son homologue, le Waddi Tiwi, plus au nord lui est parallèle mais avec des versants escarpés et de gros blocs jonchant son talweg.
- A 200 km de Muscate, le Waddi Bani Khalid est le plus grand réseau fluvial d'Oman avec une longueur de plus de 150 km et un bassin

versant de plus de 4000 km². Alimenté par de nombreuses sources (Ain Hamouda, Ain al Sarooj, Ain Dawwa) il draine la partie la plus orientale des montagnes Hajar vers le sud dans la mer d'Oman. Plusieurs autres oueds drainent le nord dans le golfe d'Oman, tels que B. Wadi Shab et Wadi Tiwi, dont la zone d'origine est située à un peu moins de 5 km de celle de Waddi Bani Khalid. Ce waddi est l'un des oueds les plus connus du Sultanat d'Oman. Son ruisseau maintient un débit d'eau constant tout au long de l'année. De grandes vasques d'eau et de rochers s'échelonnent le long de l'oued, propices à la baignade (poissons nettoyeurs - *Garra Rufa*). En tant qu'aire géographique, l'oued couvre une large bande de plaine et les montagnes Hajar. Les morphologies karstiques (*Kuhūf*) sont caractéristiques de cet oued. Il s'agit notamment de la grotte de *Kahf Maqal* qui a été décrite comme une chambre souterraine, parmi des centaines de cavités et grottes. La beauté des lieux a attiré le tourisme et l'endroit a été aménagé. Les premiers établis-



Photo 6
Aven de Majlis AL.

séments sont situés dans les cours supérieurs avant la formation des bassins d'eau douce à Muqal. De là, l'oued est bordé d'arbres et de palmiers; et l'eau apparaît également en saison sèche. Puis, plusieurs localités ont vu le jour (Halfah, Bidah, Sayq, Sabt). Puis l'oued débouche dans la grande plaine entre Hajar et Rima Al Wahiba pour former un lit anastomosé (jusqu'à 4 km de large) pour former Al Kamil Wal Wafi.

Au Dhorfar (SW), la route de Sarfait dite "*Dhofar Furious Road*", file tout droit vers la frontière yéménite, au cœur de la plaine de Salalah et des plantations d'arbres à encens. La Furious Road apparaît environ 8 km au-delà de Mughsail, dans une série de lacets serrés sur un dénivelé de plus de 1 000 m. Falaises abruptes et ravins sauvages se succèdent et forment le décor. Cette route vertigineuse se situe dans les montagnes (Jabad Al Qamar, Qara et Samban culminent à plus de 1 800 m) qui dominent l'arrière-pays de Rakhyut.

Au fond des canyons s'abritent de luxuriantes oasis de dattiers et citronniers, irriguées par la

technique ancestrale des *falaj* (aqueducs courant à flanc de montagne) qui attirent les touristes.

4. Les modelés karstiques

La surrection d'importantes plateformes carbonatées combinée à une pluviométrie importante (mousson) est à l'origine d'une importante karstogénèse génératrice notamment d'avens, de grottes importantes et, sur le littoral, de cenotes (Salomon, 2003) et d'encoches biokarstiques.

Le plateau de Selma est un synclinal peu profond sur le flanc nord-est de l'anticlinal de Jabal Bani Jabir. Majlis al Jinn est située dans une zone isolée du plateau de Selma à 1 380 m d'altitude, à 100 km au sud-est de Mascate. La cavité a été formée dans les roches carbonatées fossilifères de l'Éocène moyen (Photo 6).

On y pénètre par l'entrée d'un aven en entonnoir inversé et l'accès se faisant uniquement par descente verticale sur corde en rappel. Majlis al Jinn, mesurée par sa surface au sol (310 m x 225 m, soit 58 000 m²), fut considérée en 1985 comme la deuxième plus grande chambre connue dans le monde



Photo 7
Galerie de Hootah.



Photo 8
Plancher à sec d'un lac intermittent et spéléologue.

(ce n'est plus le cas) avec un volume d'environ 4 000 000 m³. Le plafond en dôme a 120 m de hauteur et la partie la plus profonde se trouve à 178 m sous le sommet de l'entrée la plus haute. C'est l'une des cinq entrées de grottes verticales du plateau de Selma, mais la seule sans sortie inférieure car les passages ont probablement été bloqués par des éboulements sur le sol des conduits. L'eau entrant dans la grotte s'accumule le long de la partie la plus basse du sol, puis s'infiltré lentement dans les sédiments à grains fins et boueux fissurés. Les entrées reçoivent le ruissellement de surface d'une petite zone de drainage, de sorte que l'eau atteint difficilement les galeries de la grotte d'autant que le plafond mesure environ 40 m d'épaisseur sur la majeure partie de la grotte. De plus, alors que les températures de surface peuvent dépasser 40 °C, les températures de l'air dans la chambre sont constantes de 17 à 18 °C mais restent chaudes et l'eau s'évapore. Du coup, il n'y a que quelques stalactites et draperies sur le plafond et les parois, mais de petits spéléothèmes et fragiles sont fréquents sur le sol. La croissance se produit uniquement pendant les périodes d'infiltration et de gouttes après de fortes pluies: elle est donc très lente.

Les ouvertures d'entrée dans le plafond fournissent la lumière ambiante dans la chambre presque toute la journée et des restes de chèvres, d'oiseaux et de serpents ont été trouvés sur le plancher de la chambre.

Dans la partie nord de Salalah le versant calcaire marin abrite un certain nombre de cascades de tufs et de cavités dans le calcaire dont la grotte de Suhur, riche en fossiles (coraux, gastéropodes, etc.). L'entrée est une grande salle ouverte d'une superficie de 40 m x 45 m. L'ouverture en forme

d'arc mesure 20 m de haut. Les salles à l'intérieur sont humides et la température varie entre 30 et 35 °C. Les principales caractéristiques de la grotte sont des fistuleuses du plafond et les gours à parois de calcite. La grotte constitue un refuge pour les colonies de chauves-souris et autres insectes et araignées.

Sur la pente sud du Jabal Akhdar (route Nizwa-Tanuf - Jabal Shams) se situe la grotte de Al Hootah (Photo 7), estimée à plus de 2 Ma. Il s'agit de la seule grotte touristique de la péninsule arabique d'une longueur totale d'environ 5 km. L'accès se fait par un petit train: le parcours qui se visite (500 m) est sécurisé mais décevant. Mais elle est également accessible par deux entrées, l'une à 1 km du village d'Al Hootah, l'autre à 800 m, vers Al Hamra. L'humidité de la galerie est très élevée (90 %). La roche est essentiellement calcaire, parfois dolomitique. Les cupules d'érosion au plafond indiquent que la genèse d'origine s'est effectuée par un écoulement sous pression. Aujourd'hui encore les concrétions sont rares et les parois plutôt lisses. A signaler une salle de 150 m et de haut plafond (65 m). La grotte d'Al Hootah comprend quatre lacs (Photo 8). Trois sont petits et situés au nord de la grotte, l'autre est le lac central accessible. On estime qu'il contient environ 30 000 m³ d'eau. Il abrite une faune souterraine abondante et variée dont une espèce de poissons aveugles dépigmentés unique au monde, le Bu Naseh (*Garra Bareimiae*). De nombreuses autres espèces animales vivant dans la grotte, notamment des chauves-souris (*Rhinopoma muscatellum*), des arthropodes, des mollusques, des araignées, des escargots et des coléoptères aquatiques. Cet écosystème, particulièrement riche, s'explique par l'abon-



Photo 9
Wadi Darbat (Dhofar) - Cascade pétrifiante.

dance des éléments nutritifs, issus de la surface, et qui circulent dans les galeries.

La grotte de Tahery est située dans les montagnes du Hajar oriental de la région d'Al Sharqiyah, proche du littoral. C'est est une grotte assez massive et c'est probablement la seule entrée, accessible à pied, du réseau de galeries du plateau de Salma. L'entrée liée à une fracture, mesure environ 20 m de haut et est tout aussi large. La grotte est probablement le point le plus bas du réseau et constitue l'exutoire des eaux qui rejoignent la gorge de calcaires blancs du Wadi Taab. Les inondations y sont fréquentes et représentent un risque de blocage à l'intérieur pour les spéléologues.

A proximité se trouve le réseau de grottes de 7th Hole probablement interconnecté au précédent.

Les pentes sud du Dhofar bénéficient d'une bonne pluviométrie, mais le sol ne retient pas l'eau qui s'infiltré dans les calcaires karstifiés. Les rivières souterraines drainent les eaux du Jabal Aram dans le Wadi Darbat, qui doit franchir une falaise calcaire abrupte avant de rejoindre la plaine côtière. D'autres cours souterrains alimentent des sources pérennes au pied des collines. Celle de Jarziz, la plus importan-

te, a un débit estimé à 150 m³ d'eau par heure. Ces eaux, lorsqu'elles ne sont pas exploitées, disparaissent à nouveau sous terre dans les contreforts et réapparaissent pour alimenter de vastes ruisseaux d'eau douce dans la ceinture côtière séparée de la mer uniquement par des barres de sable étroites. L'eau douce est facilement accessible à partir de puits peu profonds à une distance de cent mètres de la ligne des hautes eaux et jusqu'à une distance de 2 km à l'intérieur des terres.

Au nord de Al Saada, il convient de signaler également les superbes cascades de tuf et travertin du Wadi Darbat (jusqu'à plus de 30 m de hauteur; Photo 9) avec bassins d'eau bleue le tout sur une quinzaine de kilomètres. Du coup plusieurs villages touristiques et aires de pique-niques se sont créés aux abords.

5. Les espaces désertiques

Ils sont nombreux vu le climat aride. Il existe à Oman une très grande dépression endoréique, la



Photo 10
Erg de Wahiba.

sebkha d'Umm as Samin⁴ se prolongeant sous l'erg du Rub-al-Khali. Il s'agit d'une vaste plaine de sel vers laquelle convergent de nombreux oueds qui coulent vers le sud-ouest depuis le secteur central des montagnes du nord.

La sebkha d'Umm as Samin, est alimentée par les sédiments des dunes à l'ouest, les alluvions des montagnes d'Oman à l'est et les eaux souterraines des aquifères calcaires de la formation tertiaire d'Umm Er Radhuma à l'est et au sud. D'une superficie d'environ 5 000 km² (55 m d'altitude), Umm as Samin est l'une des plus grandes sebkhas de la péninsule arabique et abrite une nappe phréatique le long de la limite de la bordure orientale de l'erg arabe, alimentée par les infiltrations des nombreux oueds (Wadi Aswad, Wadi Musallim, Wadi Majhul, Wadi Umayri et Wadi Haliban) s'écoulant des Montagnes d'Oman.

Les secteurs hébergeant des sels capillaires de l'Holocène ont généralement moins de quelques

mètres d'épaisseur. Aujourd'hui, l'alimentation en eau d'eau est dominée par les suintements alluviaux, mais il y a 6 000 ans, les eaux étaient plus abondantes et beaucoup moins salines. La dépression abritait un lac pérenne. La sebkha s'est formée par déflation dans les terrains gypsifères. Au cours du Pléistocène supérieur (de 30 à 20 Ma), la dépression fermée s'est muée en lac salin et les écoulements fluviaux y ont amené du limon et de l'argile détritiques. Avec un climat plus sec (de 20 à 15 Ma), le lac s'est transformé en sebkha. Vers la fin du Pléistocène (de 15 à 12 Ma), des conditions plus humides sont revenues et un lac salin pérenne a été rétabli, par lequel l'halite a été dissoute, mais le gypse est resté. Dans l'intervalle de 12 à 9 Ma, les conditions de sécheresse ont de nouveau été établies avec dépôt de gypse et d'halite dans une matrice sableuse. Enfin, lors de la phase humide de l'Holocène (de 10 à 5.5 Ma), un lac salin s'est formé à nouveau, avec dépôts de gypse/halite capillaire aride (de 5.5 Ma à nos jours).

Aujourd'hui, la nappe phréatique d'Umm as Samin subit toujours des inondations occasionnelles. Au fur et à mesure qu'une nappe d'eau de crue s'épuise, des croûtes de sel alimentées par capilla-

⁴ Le terme sebkha, désigne une dépression à fond plat, généralement inondable, où les sols salés limitent la végétation. La sebkha peut être lacustre car elle peut être alimentée en saison des pluies par des eaux artésiennes (infiltrations dans les versants du pourtour) ; puis les eaux s'évaporent et laissent des sels qu'elles ont remonté.



Photo 11
Oasis artificielle utilisant la nappe phréatique, pour le tourisme.

rité se développent. La couche de sel qui s'épaissit passe de fines couches de sel à des croûtes polygone de sel surimprimées puis et à des caractéristiques méga-polygonales, épaisses et striées, de pression. Une majeure partie de cette croûte de surface se dissoudra à nouveau lors de la prochaine inondation importante. Tout au long du processus de dessiccation, la nappe saline régionale ne se trouve qu'à quelques dizaines de centimètres sous la surface: des véhicules lourds peuvent s'y embourber. En phase d'inondation, de petits trous et cavités karstiques se développent en rapport avec la dissolution du sel sous-jacent.

À la surface de la sebkha, se développe sur la croûte un réseau de polygones de sel gris-blanc avec une accumulation de cristaux dans les fissures de dessiccation autour des marges du polygone. Parfois les polygones sont irréguliers et perturbés avec des remparts de sel soulevés et déjetés (crêtes de pression). La nappe phréatique est souvent perceptible sous forme de bassins de saumure. Lorsqu'elle est peu profonde, elle peut être exploitée sous forme d'oasis artificielle pour le tourisme (cas de la Huacachina près de Ica - Pérou; ou comme ici dans la partie omanaise du désert de Rub al Khali (Photo 10). Ces caractéristiques classiques des sebkhas se retrouvent en Tunisie (Sidi el Hani), dans les salars andins d'Amérique du Sud (Uyuni, Atacama) ou à Etosha (Namibie).

Un autre exemple est le désert de Wahiba qui prend son nom de la tribu *Wahiba*. La zone s'étend sur 180 km du nord au sud et 80 km d'est en ouest, sur une superficie d'environ 12 500 km² (Photo 11) On y note 150 espèces de flore endémique et 16 000 invertébrés, 200 espèces d'animaux sauvages, avifaune comprise. La formation de ce désert remonte au Quaternaire, et résulte des conflits des vents



Photo 12
Ghour dans le Wahi.

contraires de la mousson du sud-ouest et de l'alizé du nord-est (*Shamal*). Dans le détail ces vents contraires peuvent générer des ghours (Photo 12). D'après les types de dunes, on divise la région en deux: la *Wahiba haute*, avec des systèmes de méga-crêtes de sable, orientés nord-sud, supposés être formés par la mousson. Celles du nord, datant d'après la dernière glaciation régionale, atteignent une altitude de 100 m. Et la *Wahiba basse*, aux dunes plus mesurées.

Les limites nord et ouest du désert sont délimitées par les systèmes fluviaux du *Wadi Batha* et du *Wadi Andam*. Le sable de surface recouvre une ancienne couche de sable carbonaté et cimenté. Les alluvions supposées provenir de l'oued *Batha*, au Paléolithique, ont été déposées dans le désert central à 200 m sous la surface inter dunaire. Par la suite, l'érosion éolienne a contribué à la formation d'une plaine proche, au sud-ouest. La zone est occupée par des Bédouins, qui viennent à Al Huyawah, une oasis près de la limite du désert, entre juin et septembre, pour cueillir les dattes.

6. Le Littoral

Oman développe un littoral de plages de sable, de falaises rocheuses et de récifs coralliens d'une longueur de 1 700 km. La côte borde le golfe d'Oman, la mer d'Oman et l'océan Indien. L'ensemble est sous l'emprise d'un climat subtropical qui donne des températures chaudes toute l'année et des précipitations limitées à moins de 100 mm/an. Tout ceci est très favorable au tourisme balnéaire et les stations touristiques se sont multipliées (sable, eaux chaudes, couleur turquoise). Parmi les meilleurs sites on citera:

À nord de Mascate, l'Archipel de Daymaniyat (9 îles pour 100 ha) sont un site de plongée sous-ma-



Photo 13
Plage de Tiwi et ses falaises de grès

rine réputé et constitue une réserve naturelle 18 km au large de la côte de Barka. La réserve possède un riche patrimoine naturel et regorge de plusieurs types de récifs coralliens, dont certains assez rares. C'est véritable joyau composé de lagons bleu turquoise et de paysages où seuls les oiseaux de mer ont élu domicile. Tombants, récifs, patates de coraux posés sur le sable, alcyonnaires, grottes, et tunnels sont peuplés d'une faune riche et variée : tortues, raies aigle et pastenagues, requins, diodons, bancs de carangues, etc. Un grand nombre de tortues de mer viennent y pondre leurs œufs et y nichent. Les plages se composent de sables blancs coralliens.

Bassa se situe à l'extrême nord du territoire. La plage se compose principalement de graviers et de sables grossiers ce qui traduit la proximité des montagnes. White Beach est un endroit isolé aux plages tapissées d'un sable blanc très lumineux donnant sur une belle eau de mer. La couleur spécifique des grains de sable provient des roches argileu-

ses blanches qui forment le paysage des hauteurs de Wadi Shab. Mais l'endroit permet de se faire une excellente idée de ce que peut être un rivage typiquement tropical. Le site proche de Tiwi développe ses falaises de grès sensibles à la corrosion (encoches et passages-tunnels en bordure de mer) et à la bio-corrosion (nombreux lithophages). Ces lithophages consomment des algues incrustantes qui trouvent leur optimum de croissance au niveau des plus hautes mers moyennes et, en se nourrissant, ils arrachent un peu de la roche. A terme, cela provoque une encoche dite marine, forme bien connue des littoraux tropicaux (*notches*) et qui constituent un excellent repère d'un niveau marin ancien. Par ailleurs, les plages se couvrent de galets et de sables grossiers tandis qu'en mer s'isolent de gros rochers (Photo 13).

Qurum à 1.5 km de l'autoroute de Mascate. C'est un véritable lido, à l'est de l'agglomération de Mascate, bordé d'espaces verts aménagés (corniche) et de quelques palmiers. Al Sifah est une vaste



Photo 14
Trous souffleurs près de Marneef Cave (Dhofar).

étendue, au nord de la marina de Sifah, qui se compose principalement de graviers et de sable doré.

Ras al Jinz est une longue étendue de sable clair bordée de grandes roches. C'est une Réserve de tortues marine dont l'accès est protégé. Chaque année, des milliers de tortues de mer migrent des rives du golfe Persique et de la mer Rouge pour pondre leurs œufs sur les plages. Des réserves ont été mises en place pour les protéger mais, avec un guide, offrent la possibilité de les voir venir à terre le soir, pondre leur œuf et quitter leur nid le matin.

Au Dhofar, Al Fizayah est une suite de plusieurs criques plus ou moins grandes entre des falaises. L'accès est difficile et souvent la plage est déserte. Plongée poisson tropicaux abondant et variés. Le sable blanc est parcouru par des crabes. Les roches de bordure de mer sont affectées d'encoches de bio-corrosion soulignant les variations relatives et récentes du niveau de la mer. Al Mughsail est une vaste étendue de plusieurs km de sables blancs dominée par de hautes falaises. Près de Marneef Cave, une attraction est mise en valeur par la construction d'une passerelle, de trous souffleurs (Photo 14).

6.1. Bimmah ou le Gouffre de l'Étoile filante (Falling Star Sinkhole)

Bimmah situé dans le parc Hawiyat Najm, à quelques kilomètres de Tiwi, est récemment devenu une destination très populaire pour les visiteurs: beaucoup viennent ici pour voir cette formation unique et pour se baigner dans son eau. La légende locale, affirme que le trou a été formé en raison de la chute d'un météore à cet endroit (en arabe Hawiyyat Najm qui signifie "*le puits profond de l'étoile filante*"). Cependant, Bimmah Sinkhole s'est produit naturellement en raison de l'érosion calcaire et de l'effondrement des roches formant ce que vous voyez. Le gouffre est également relié à la mer par une galerie souterraine, ce qui explique la couleur bleu-turquoise de l'eau. En fait il s'agit d'un cenote⁵ qui mesure 50 m sur 70 m de large pour environ 20 m de profondeur. Il n'est qu'à environ 600 m de la mer, entre les villes côtières de Dibāb et Bamah (Bimmah).

Le gouffre a été formé par un effondrement de la couche de surface en raison de la dissolution

⁵ Le terme de cenote vient de l'ancien maya *tz'onot* (= cavité avec de l'eau). Par définition un cenote contient de l'eau car il donne regard sur la nappe aquifère régionale. À la différence des gouffres et autres dolines d'effondrement, les cenotes ne donnent pas passage à des conduits vadoses. Cependant il peut arriver qu'en fonction des fluctuations du toit de la nappe, ils soient momentanément asséchés. Ce terme est plus précis que le vague "*sinkhole*" de la littérature anglo-saxonne, aussi a-t-il été utilisé relativement tôt dans la littérature.



Photo 15

Le cenote de Bimmah. Eau douce et, en-dessous, poissons tropicaux en eau salée.

du calcaire sous-jacent qui s'est produit postérieurement à la formation d'une salle souterraine sous-jacente. En fait il s'agit d'un regard sur la nappe phréatique. Les parois reflètent l'inégale sensibilité des strates par rapport à l'érosion (corrosion + éboulement gravitaires) ce dont témoignent les chaos de blocs jonchant le fond du cenote, notamment en son centre (blocs tombés du plafond) (Photo 15).

Il est intéressant de noter que le cenote est relié à la mer. Non seulement son eau est de la même couleur, mais lorsqu'on y plonge on peut observer des poissons tropicaux (petits Scaridae, labres) nageant dans au fond dans l'eau salée (plus dense) surmontée par de l'eau douce. Des mélanges d'eau, notamment favorisés par les marées, peuvent se produire favorisant la *mixing corrosion*, processus à très grand pouvoir corrosif. A plus grande échelle les variations eustatiques quaternaires du niveau marin ont certainement joué. La présence de stalactites aujourd'hui ennoyées en serait une preuve. Lors du maximum glaciaire (vers - 18 000 ans), le niveau de la mer est descendu à environ - 110 m: à ce moment-là la karstification conduisant à la formation des cenotes a pu opérer. Au départ se produisent des infiltrations généralisées au travers des diaclases, qui alimentent un niveau phréatique. Puis interviennent une corrosion et un creusement phréatique sans doute à partir du plafond d'une petite cavité car au niveau du plancher

l'eau a tendance à être saturée. Finalement une petite voûte apparaît qui évolue en salle souterraine. Par la suite, le cenote s'agrandit de tous côtés, à la fois par abaissement du niveau phréatique, par démolition progressive des strates avec la corrosion et les porte-à-faux et par l'action dissolvantes des eaux d'infiltration venues de la surface, encore agressives, et élargissant les conduits. Ensuite, le vide créé dans la masse rocheuse provoque l'effondrement du plancher en surface.

Posséder aujourd'hui un cenote est une aubaine. Avec quelques faibles aménagements tels que la constitution d'un sentier d'accès bien balisé et un escalier permettant de descendre dans l'eau, tiède et cristalline, les propriétaires lèvent des péages. Certains présentent de véritables colonnes de cathédrale. Tous sont différents, les uns à dominante blanche, d'autres de couleur ocre, mais tous ont en commun une eau tiède et cristalline. De nombreuses sociétés de tourisme, se sont abouchés avec les exploitants: ils y amènent des groupes de baigneurs. Le développement touristique n'est pas sans effets sur les écosystèmes qui constituent sa raison d'être. La pression touristique induit des modifications environnementales, et l'impact est d'autant plus grand que la fréquentation des intervenants est plus dense et que le milieu est plus fragile. A Cuba où ils portent le nom de *casimbas*, tout comme aux Bahamas

et au Belize (*blue-holes*), ils constituent une grande attraction touristique.

Bibliographie

- Cingolani, C. (2001). *Field trip guide on the lower paleozoic Precordillera ophiolites*. *Miscelánea*, 7.
- De Souza, S., Tremblay, A., Ruffet, G., & Pinet, N. (2011). Ophiolite obduction in the Quebec Appalachians, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 49(1), 91-110. <https://doi.org/10.1139/e11-037>
- Dilek, Y., & Furnes, H. (2011). *Genèse d'Ophiolite et tectonique globale: empreinte géochimique et tectonique de lithosphère océanique antique*. *Bulletin de la Société géologique d'Amérique*, 123(3/4), 387-411.
- Hacker, B. R. (1991). Le Rôle De La Déformation Dans La Formation De Gradients Métamorphiques: Subduction de Ridge sous l'ophiolite d'Oman. *Tectonique*, 10(2), 455-473.
- Hacker, B. R., Mosenfelder, J. L., & Gnos, E. (1996). Rapid emplacement of the Oman ophiolite: thermal and geochronologic constraints. *Tectonique*, 15(6): 1230-1247.
- Hanna, S. S. (1995). *Field guide to the geology of Oman*, vol. 1. Western Hajar Mountains and Musandam. Sultanat d'Oman: Historical Association of Oman.
- Pearce, J. A., & Robinson, P. T. (2010). *Le complexe ophiolitique de Troodos s'est probablement formé dans une initiation de subduction, réglage de bord de dalle*. *Recherche Gondwana*, 18(1), 60-81.
- Salomon, J. -N. (2003). Cenotes et trous bleus, sites remarquables menacés par l'écotourisme. *Cahiers d'Outre-Mer*, 223, 327-352.
- Schreurs, J., & Millson, J. (2006). *Ophiolites une merveille naturelle*. Retrieved from http://home.kpn.nl/~lilian_schreurs/GeologyOman/Ophiolite.pdf