

GÉOCHRONIQUE

n°151

Magazine des Géosciences
Septembre 2019 / 15 €

Paléoenvironnements méditerranéens

une coédition



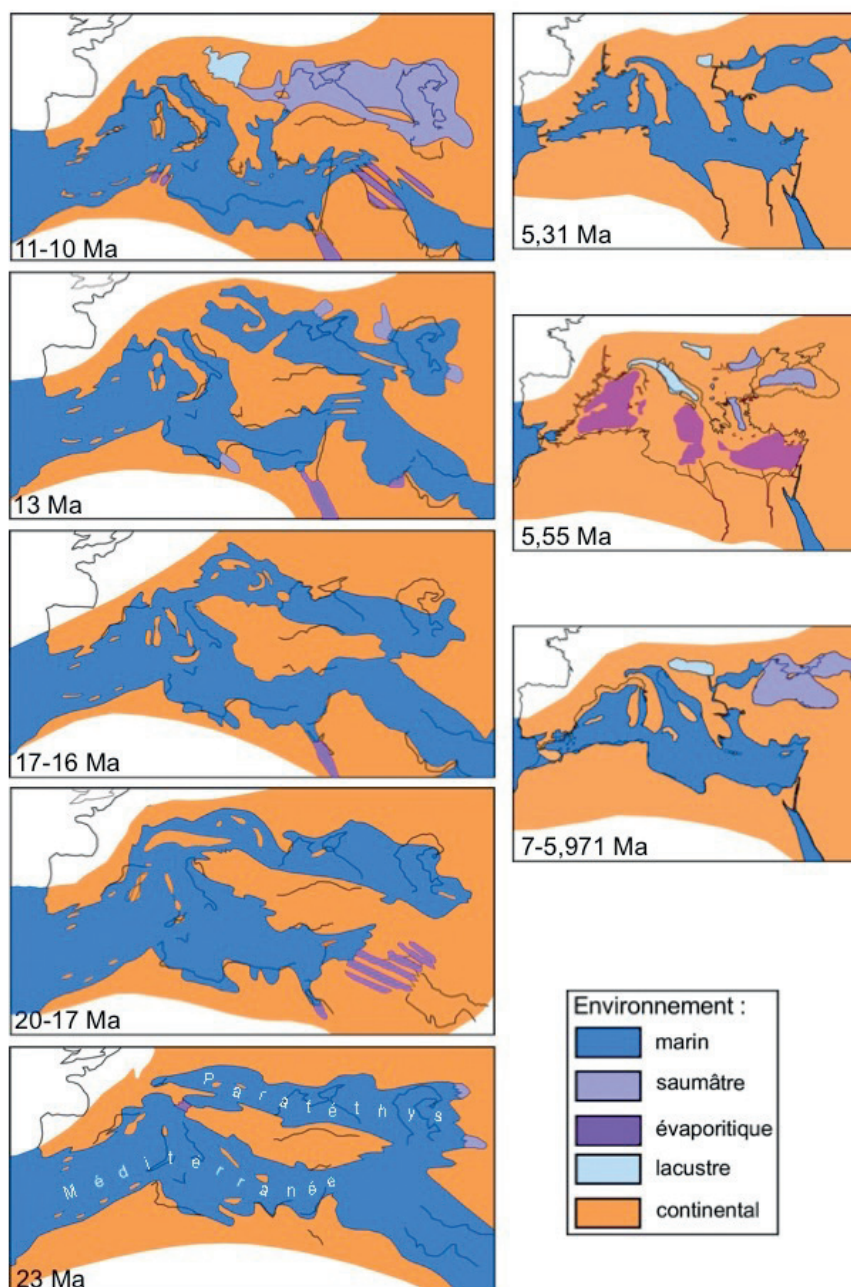
1 > Évolution des environnements depuis 23 Ma dans le domaine

Le domaine méditerranéen *s.l.*, espace marin tantôt plus vaste qu'aujourd'hui tantôt plus restreint, incluant la Paratéthys (fig. 1-1), mer adjacente épisodiquement marine, saumâtre ou lacustre, est un lieu exceptionnel pour l'étude du Cénozoïque supérieur. Avec un grand nombre de forages et de profils sismiques académiques ou industriels et sa richesse en affleurements de séries lacustres ou marines, souvent émergées dans les arcs insulaires passés ou actifs, le

domaine méditerranéen est le terrain de prédilection de la bio-chrono-stratigraphie du Néogène et du Quaternaire. Dès son origine, l'espace marin comprenait seuils et détroits dont les mouvements ont réglé les migrations et l'adaptation des organismes marins et terrestres ainsi que leur diversité. La tectonique en a profondément modifié la physiographie jusqu'à s'apparenter à celle d'aujourd'hui vers 5 Ma (fig. 1-1). ●●●



Fig. 1-1. – Évolution paléogéographique et paléoenvironnementale de la Méditerranée et de la Paratéthys entre 23 et 5 Ma. Bien que son histoire ne soit pas directement liée à l'évolution géodynamique de la Téthys mésozoïque, la Paratéthys n'en constitue pas moins un bassin peu profond qui s'individualise sur sa marge nord vers la fin de l'Éocène - début de l'Oligocène.



marins et continentaux méditerranéen

●●● Secteur privilégié des latitudes moyennes, le domaine méditerranéen fut constamment au cours des derniers 23 millions d'années à la transition entre domaines humides au nord et domaines désertiques au sud. L'abondance de longs enregistrements sédimentaires finement datés favorise la restitution des environnements marins par la micropaléontologie (foraminifères,

nannofossiles calcaires, ostracodes, kystes de dinoflagellés, diatomées) et par la géochimie comme celle des milieux continentaux par les grains de pollen (fig. 1-2). Plus limitée temporellement mais avec maillage spatial dense, la paléontologie et la paléobotanique complètent les restitutions environnementales et renseignent efficacement sur la biodiversité.

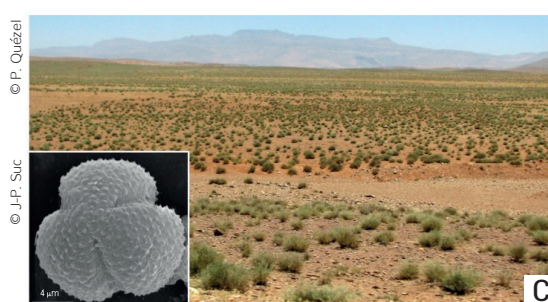
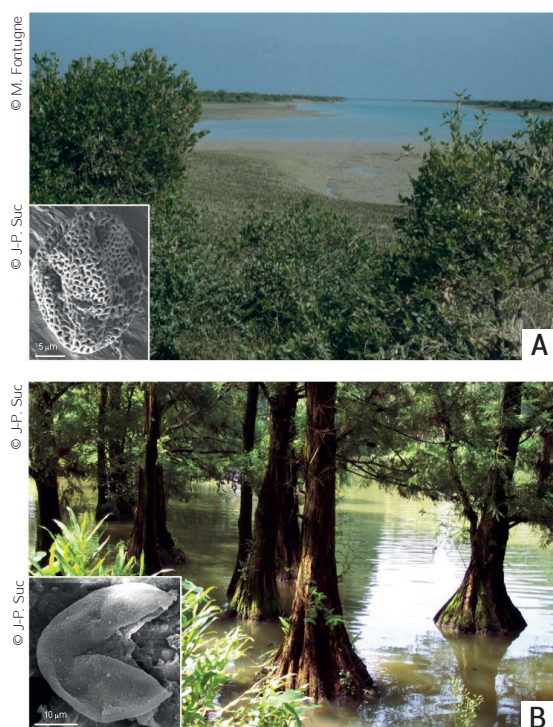


Fig. 1-2. – Évocation à partir de photographies actuelles de paysages végétaux successifs des littoraux nord-ouest méditerranéens identifiés à partir des flores polliniques.

A) Mangrove à *Avicennia* du golfe arabo-persique, representative de la mangrove ayant peuplé les littoraux méditerranéens pendant le Miocène, et pollen fossile d'*Avicennia* du Miocène moyen du Languedoc.

B) Forêt à *Glyptostrobus pensilis* des marécages de Chine méridionale, illustrant les groupements végétaux du Pliocène tout autour de la Méditerranée où ils subsistèrent jusqu'au Pléistocène moyen, et pollen fossile de *Glyptostrobus* du Pléistocène inférieur-moyen de la mer Noire.

C) Steppe à *Artemisia* du sud marocain, ayant envahi tout le domaine péri-méditerranéen lors de chaque glaciation quaternaire, et pollen fossile d'*Artemisia* du Würm d'Italie méridionale.

Au Miocène, un domaine principalement soumis aux vicissitudes tectoniques

La géodynamique, la formation des reliefs notamment, a successivement restreint la zone d'échanges entre Méditerranée et océan Indien, puis les communications avec l'océan Atlantique tandis que la Paratéthis se réduisait et s'isolait de plus en plus (fig. 1-1). L'évolution du climat global (fig. 1-3) régissait les peuplements marins méditerranéens qui étaient ceux des océans Atlantique et Indien aux mêmes latitudes, puis ceux de l'océan Atlantique seul depuis 20 Ma (fig. 1-1). Les récifs coralliens (fig. 1-4A-C) et la mangrove à *Avicennia* (fig. 1-2A ; mangrove appauvrie avec une extension actuelle légèrement extratropicale) étaient alors des constituants majeurs des littoraux septentrionaux et méridionaux méditerranéens et paratéthisiens jusqu'à 13 Ma puis des seuls littoraux méridionaux jusqu'à 5,6 Ma. Les terres au nord

étaient occupées par des forêts gardant continuellement leur feuillage (autrement dit sempervirentes) sous des conditions tropicales à subtropicales humides rappelant les forêts actuelles de Chine méridionale tandis que les terres au sud portaient une végétation subdésertique sous des conditions également chaudes et sèches. Le gradient thermique latitudinal était alors plus faible que de nos jours ($0,46^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{latitude}$ contre 0,6) mais le contraste nord-sud en termes de précipitations était plus fort qu'aujourd'hui (fig. 1-3).

Un paradis récifal

Des récifs coralliens ont jalonné les rivages selon la structuration de la Méditerranée et les vicissitudes climatiques ou paléo-océaniques, évoluant d'appareils à forte biodiversité mais peu ●●●

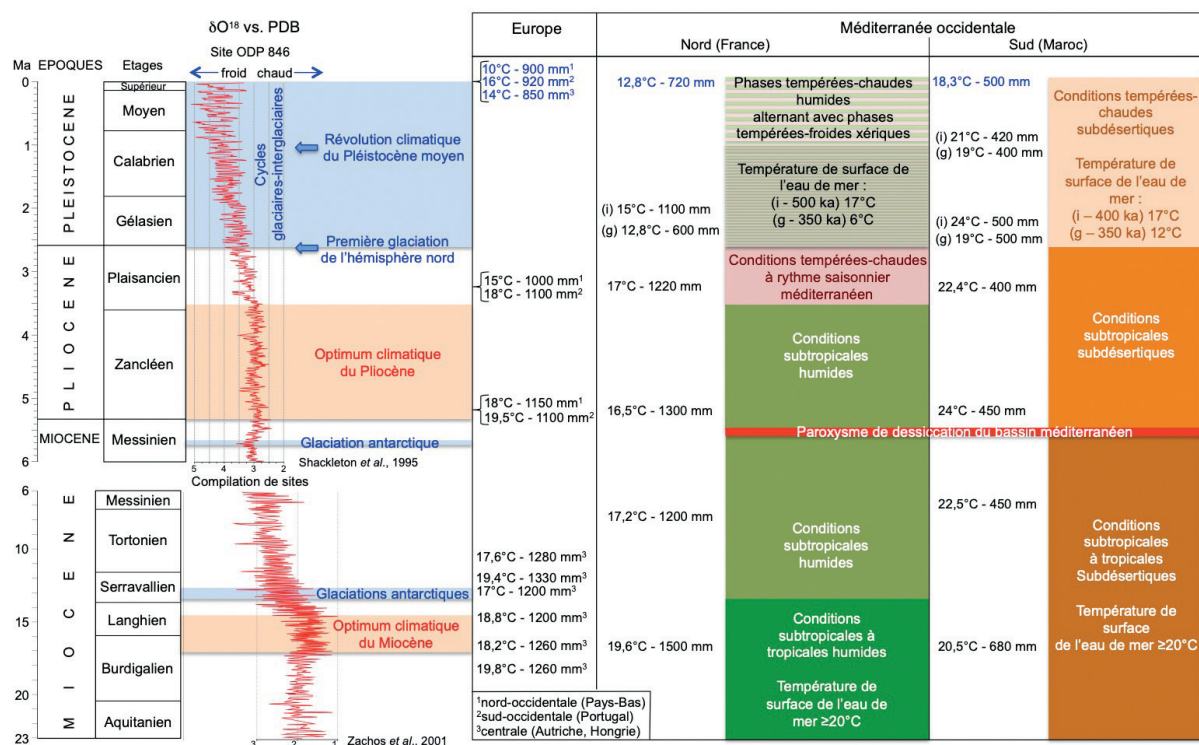


Fig. 1-3. – Climat de Méditerranée occidentale depuis 23 Ma dans le cadre de l'évolution climatique globale (courbes isotopiques de l'oxygène). Les valeurs des paléotempératures moyennes annuelles (°C) et des paléoprécipitations annuelles (mm) sont obtenues par fonction de transfert des flores polliniques. Les valeurs en bleu sont actuelles.

●●● importants jusqu'aux gigantesques masses récifales du Messinien à faible biodiversité. Les constructions coralliennes de l'Aquitainien occupaient des côtes peu profondes et elles étaient remarquables par la diversité des espèces de coraux participant à la trame, la plus haute diversité de l'ensemble du Miocène. Un bon exemple est donné par les affleurements aquitains de la Côte Bleue au nord de Marseille. Comme à l'Oligocène, les coraux du genre *Acropora*, actuellement bien représentés dans les récifs du monde entier, y sont encore fréquents. Les constructions consistent en des bancs successifs dans un environnement soumis à des décharges détritiques. D'autres développements récifaux sont connus à cette période, notamment à Chypre, en Sicile et en Libye. Des conditions propices aux récifs coralliens ne se retrouvent ensuite qu'à la fin du Burdigalien où de vastes plates-formes carbonatées avec une composante récifale marquée par une diversité corallienne relativement moins importante se développèrent en plusieurs secteurs de la Méditerranée (Corse, Sardaigne, Espagne, Israël). Au Langhien, des récifs de taille plus conséquente mais à faible biodiversité sont localisés en France (Languedoc), Espagne (Catalogne), Algérie et Paratéthys. Déjà les genres *Porites* et *Tarbellastraea* s'avèrent dominants dans ces édifices. Le Serravallien correspond à une période de crise pour les environnements récifaux, probablement en raison de la baisse des températures. Le Miocène supérieur est caractérisé de nouveau par la présence de fonds coralliens à caractère subtropical. Plus particulièrement, la transgression du Tortonien supérieur fut accompagnée d'abondantes constructions coralliennes (fig. 1-4A-C).

Ces coraux récifaux ont colonisé une grande partie de l'espace méditerranéen (Corse, Italie, Maroc, Algérie, Crète, Chypre) et leurs vestiges soulevés jusqu'à 1 500 m d'altitude, ont été trouvés au Maroc jusque dans le Moyen Atlas. Bien qu'exubérante, cette activité récifale était due à un nombre plus réduit de genres et d'espèces, sans doute depuis le refroidissement des eaux du Serravallien. Au début du Messinien, la Méditerranée est restée un véritable paradis récifal, sans doute vivant et coloré même si la diversité corallienne s'était encore amenuisée. Des récifs coralliens ont en effet colonisé toutes les aires littorales, atteignant une extension et une ampleur inégalée. En Afrique du Nord, surtout en Algérie, ils se sont étendus sur des fronts de plusieurs centaines de kilomètres accompagnant souvent le développement de plates-formes carbonatées riches en algues calcaires et en mollusques avec une production littorale bio-carbonatée rarement atteinte. Dans le sud-est de l'Espagne, ces masses calcaires, aujourd'hui émergées, font partie intégrante du paysage d'Alicante à Almeria. Simultanément, des récifs imposants se sont aussi formés aux Baléares, en Italie méridionale, en Sicile, à Malte, Lampedusa, Chypre, et au Proche-Orient. Des témoins plus modestes attestent de la réalité de cette activité corallienne dans diverses îles grecques et en Tunisie. Au cours de cet épisode particulièrement explosif, la diversité corallienne continua de diminuer. Ainsi les derniers récifs, curieusement parmi les plus imposants de l'histoire méditerranéenne, sont-ils quasi-intégralement bâtis par le seul genre *Porites* avec, accessoirement, le genre *Siderastraea*. Les raisons d'un tel déclin de la biodiversité sont peu

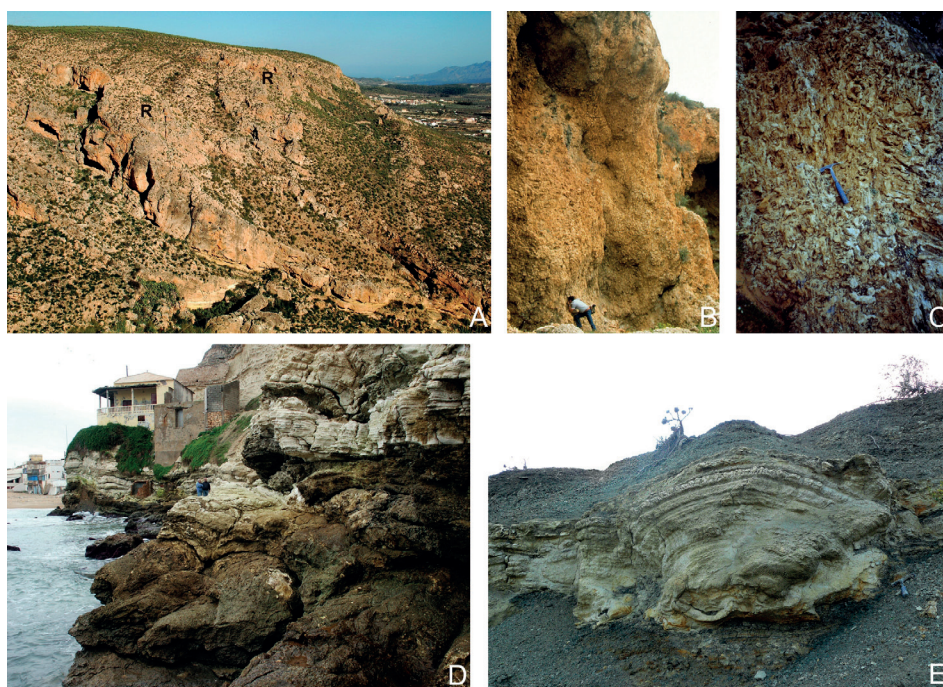


Fig. 1-4. – Bioconstructions caractéristiques du Messinien.

- A) Récifs coralliens progradants (R) du bassin de Sorbas. © J.-P. Suc**
B) Masse récifale composée uniquement de colonies en gerbes de coraux du genre *Porites*, bassin de Melilla, Maroc. © J.-P. Saint Martin
C) Détail des colonies digitées de *Porites* avec leurs expansions lamellaires, bassin de Melilla, Maroc. © J.-P. Saint Martin
D) Masses mamelonnées de constructions à stromatolites, Oranie occidentale, Algérie. © J.-P. Saint Martin
E) Niveau à grands stromatolites, Cap Bon, Tunisie. © J.-P. Saint Martin

●●● aisées à définir même si un léger refroidissement, la proximité de zones d'*upwellings* et la salinité ont été invoqués. À partir du Pliocène la Méditerranée est totalement dépourvue de fonds coralliens.

Environnements en Paratéthys

L'évolution tectonique aboutissant à la mise en place de l'arc carpatique contribua, au Néogène, au morcellement de la Paratéthys en de multiples bassins aux connexions internes et externes complexes, certains pouvant évoluer vers l'isolement et présenter un caractère paralique en fonction du jeu des communications avec les masses d'eau marines (fig. 1-1).

Au Miocène inférieur, on note des accumulations de coquilles témoignant de peuplements denses de mollusques. Le début du Miocène moyen (Langhien) est marqué dans l'ensemble des bassins par une remarquable biodiversité, avec un peuplement littoral à caractère tropical doté de riches fonds coralliens et une abondante malacofaune. Cette période particulièrement florissante est à mettre en relation avec l'optimum climatique du Miocène (fig. 1-3). Cependant, vers -14 Ma, à la suite de la restriction des communications, un épisode particulier affecte de nombreux bassins qui enregistrent une sévère crise environnementale. Souvent qualifiée aussi de "Crise de salinité", elle se traduit par des dépôts massifs d'évaporites (halite, gypse). Ces bouleversements environnementaux dont l'impact fut décisif sur la biodiversité en Paratéthys survinrent dans l'intervalle Langhien-Serravallien, la tendance à l'isolement et à la fragmentation s'accroissant. Se mirent alors en

place des milieux paraliques dont la biodiversité dépendait de brèves communications marines. Ce sont là sans doute les peuplements les plus étonnants et spectaculaires ayant envahi les fonds paratéthysiens. De nouvelles sortes de récifs dus à l'activité microbienne en association avec des bryozoaires et des serpules ont produit de grandes masses carbonatées près des littoraux tandis que les fonds se peuplaient essentiellement de mollusques montrant un caractère endémique de plus en plus prononcé. La biodiversité s'est considérablement réduite avec la disparition de nombreux groupes fauniques comme les échinodermes, les brachiopodes et de très nombreuses familles tant chez les bivalves que chez les gastéropodes. Puis, des plates-formes carbonatées caractérisées par un abondant matériel oolitique et la production abondante de coquilles de mollusques se développèrent dans les bassins peu profonds. On considère généralement, notamment sur la base des microfaunes et des faunes de mollusques, qu'à partir du Serravallien supérieur, l'ensemble des bassins, isolés des influences océaniques, acquièrent un caractère saumâtre avant de constituer des étendues éparses d'eau douce au Tortonien.

Il est à noter qu'à plusieurs périodes des indices de forte productivité se sont traduits par des dépôts de diatomites, surtout au Miocène moyen, produisant des gisements relativement importants en Hongrie, Roumanie et Bulgarie. Ensuite, les diatomées et les kystes de dinoflagellés (parfois associés à des foraminifères et des nannofossiles calcaires) illustrèrent des influx d'eaux océaniques épisodiques au sein de la Paratéthys orientale. ●●●

●●● **La Crise de salinité messinienne : un accident passager**

Les flores polliniques ont montré qu'il n'y eut pas de changement du climat à l'origine de la dessiccation du bassin méditerranéen, qui était déjà climatiquement prédisposé à un tel accident. Cet épisode ne semble pas s'être traduit par des bouleversements climatiques drastiques dans la région et, pour la végétation, se résumerait, en l'état des connaissances, à la migration des éléments subdésertiques vers des milieux septentrionaux plus favorables et à l'opportunité offerte à *Cedrus atlantica* d'un passage d'Europe en Afrique du Nord.

Des diatomites sont les ultimes dépôts marins avant les évaporites messiniennes. Elles sont généralisées dans le bassin méditerranéen sous le nom de *Tripoli*. La biosédimentation siliceuse dans diverses provinces océaniques connut une expansion remarquable au Miocène terminal. Les assemblages de diatomées reflètent directement les échanges entre les corps océaniques en connexion. C'est dans ce contexte de croissance de la productivité biologique marine mondiale qu'il faut considérer les diatomites méditerranéennes. Les diatomées révèlent à des moments différents des influx d'eaux froides atlantiques, surtout à la base des *Tripoli*, et des épisodes d'eaux chaudes. Certaines floraisons de diatomées indiquent le fonctionnement de remontées d'eaux froides (*upwellings*) à l'origine d'un appauvrissement des fonds en oxygène réduisant la faune benthique ou provoquant des mortalités. D'autres éléments plaident également en faveur d'un apport continental de silice également invoqué en relation avec l'intensification d'opale dans l'océan mondial.

À la fin du premier temps de la Crise messinienne (voir chapitre dédié), les organismes microbiens ont développé une activité intense en milieu littoral. Il s'agit cependant d'un moment bien précis connu sous l'appellation de *Terminal Carbonate Complex*. Cette prolifération microbienne a induit de très importants volumes de roches. Les stromatolites à lamination bien exprimée en constituèrent les manifestations les plus remarquables (fig. 1-4D-E). Bien souvent accompagnés par des sédiments oolitiques, ces dépôts se sont mis en place dans des milieux intertidaux à lagunaires. Ils ne renferment généralement aucune faune associée, à l'exception de quelques gastéropodes dans les dépôts oolitiques. Il s'agit de lieux aux conditions particulières probablement soumis à de sévères variations de salinité. La proximité des évaporites dans certains bassins suggère des eaux hypersalées bien que des développements de stromatolites concernent des étendues saumâtres (Tunisie). De nos jours les exemples les plus caractéristiques de stromatolites en milieu marin se trouvent ponctuellement en Australie (*Shark Bay*) et aux Bahamas, alors que c'est l'ensemble du domaine méditerranéen qui fut concerné au Messinien. Un tel événement environnemental est

sans précédent dans l'histoire de la Méditerranée et n'a guère d'équivalent dans le registre sédimentaire cénozoïque à l'échelle mondiale.

La phase de dessiccation du bassin méditerranéen a entraîné pendant un temps la disparition totale des organismes du benthos marin (mollusques, échinodermes, crustacés, bryozoaires) mais la plupart d'entre eux recolonisèrent le bassin méditerranéen immédiatement après le ré-ennoiement marin qui clôtura la crise. La persistance d'un petit bassin suspendu en mer d'Alboran, entre l'arc de Gibraltar et un chapelet dense de reliefs volcaniques actifs, aurait permis de préserver le benthos méditerranéen et d'être le vivier du réensemencement de la Méditerranée après la crise. La carte paléogéographique à 5,5 Ma (fig. 1-1) prend en compte cette éventualité élégante qui, de plus, esquisserait le pont emprunté par les mammifères et autres vertébrés terrestres dans leurs migrations nord-sud croisées.

L'incursion d'organismes paratéthysiens saumâtres (mollusques dreissenidés, ostracodes, dinoflagellés) en Méditerranée a été décrite sous le nom de biofaciès *Lago Mare*. Le processus est décrit dans le chapitre dédié à la Crise messinienne. Il s'agit en fait d'invasions épisodiques à la faveur soit de brefs hauts niveaux marins soit de déversement par-dessus le seuil égéen.

Le Pliocène, moment de tous les changements

Des changements biologiques cruciaux caractérisent cette période dans le domaine méditerranéen dont la physiographie est à peu près stabilisée dans un cadre moderne (fig. 1-1), ceci principalement sous l'effet des variations du climat (fig. 1-3). Les détériorations climatiques successives survenues à partir de 3,4 Ma ont causé l'appauvrissement en éléments subtropicaux tant dans la faune que dans la flore puis leur extinction échelonnée en fonction de la latitude, de la longitude et des contextes régionaux, rapprochant de plus en plus les écosystèmes de leurs équivalents actuels.

Les communautés forestières sempervirentes à larges feuilles des basses altitudes nord-méditerranéennes (à *Engelhardia*, *Distylium*, *Hamamelis*, *Nyssa*, *Rhoiptelea*, *Arecaceae*, *Menispermaceae*, etc.), propices à la prolifération des rongeurs murinés, régressèrent au profit des écosystèmes sclérophylles précurseurs des groupements méditerranéens modernes, ce qui fut interprété comme une première expérimentation du double rythme saisonnier à hivers frais à froids et étés chauds et secs. Simultanément, la végétation sud-méditerranéenne du Pliocène est demeurée quasiment identique à celle du Miocène, ouverte et caractérisée par une forte xéricité, malgré quelques extinctions des taxons les plus thermophiles. À l'extrême fin du Pliocène, un Homme primitif a atteint la Géorgie alors riche en forêts mixtes (sempervirentes et à feuillage caduc). ●●●

●●● Le façonnement des milieux actuels au Quaternaire

À 2,6 Ma débutèrent les cycles glaciaires-interglaciaires de l'hémisphère nord avec, sur le pourtour méditerranéen, l'expansion généralisée des steppes à *Artemisia* pendant chaque phase de refroidissement. Les interglaciaires se caractérisaient, au contraire, par un retour aux conditions antérieures plus chaudes mais toujours sèches au sud de la Méditerranée, par des conditions tempérées-chaudes et humides au nord. Ces cycles, d'une durée de 41 000 ans au début, évoluèrent progressivement vers une durée de 100 000 ans atteinte il y a un million d'années environ, ce fut la « Révolution climatique du Pléistocène moyen » (fig. 1-3).

Les faunes et flores marines évoluèrent au gré de ces variations climatiques et des courants leur permettant de pénétrer en Méditerranée. Les faunes terrestres connurent des migrations latitudinales elles aussi dictées par les vicissitudes du climat. Par exemple, la dispersion des hominidés en Europe occidentale se produisit vers 1,2 Ma.

À la différence de l'Amérique du Nord où les barrières naturelles sont orientées nord-sud, l'Europe méridionale, limitée par des barrières orientées est-ouest (reliefs, mer), ne put connaître de retour complet des écosystèmes végétaux thermophiles lors des interglaciaires les plus chauds, ce qui opéra une sélection drastique lors des migrations végétales. Ces végétaux, acculés au pied des reliefs maritimes comme ce fut le cas des séquoias en Calabre, furent alors peu à peu éliminés. Certains persistèrent dans des refuges comme *Zelkova* en Sicile, mais essentiellement concentrés aujourd'hui en Anatolie.

La contribution des flores polliniques

Leur apport à la connaissance de la flore et de la végétation péri-méditerranéennes du Néogène et du Quaternaire est déterminant. Conduite depuis 1971 dans une approche botanique avec des comptages semblables à ceux déjà menés dans le Quaternaire, l'étude des pollens du Néogène méditerranéen compte plus de 250 localités auxquelles s'ajoutent une vingtaine de longs enregistrements quaternaires et une multitude de sites holocènes. Riche de quelques 190 taxons (familles, genres ou espèces), la flore pollinique du Miocène moyen du pourtour méditerranéen se caractérise par une diversité très élevée. Les extinctions de taxons thermophiles et hygrophiles ont été enregistrées de façon asynchrone selon la latitude et la longitude.

Les remplacements successifs des écosystèmes végétaux sont très documentés sur les rivages septentrionaux (fig. 1-2) : la mangrove à *Avicennia* remplacée au Serravallien par les marécages à *Glyptostrobus* qui disparaissent à leur tour au Pliocène ; le relais des forêts subtropicales par les groupements sclérophylles au Pliocène supérieur ; l'invasion par les steppes à *Artemisia* signant les premières glaciations de l'hémisphère nord à 2,6 Ma

qui désormais alterneront avec les forêts méso-philés des interglaciaires (fig. 1-3). Les xérophytes méditerranéennes (*Olea*, *Phillyrea*, *Ceratonia*, *Pistacia*, *Nerium*, *Quercus ilex*), présentes dès le début du Miocène, bénéficièrent de cette évolution puis, lors de refroidissements, tirèrent peut-être parti de certaines phases de grande instabilité dans la saisonnalité et de faible variabilité de la chaleur reçue en relation avec certains paramètres astronomiques. Avant son élimination du domaine nord-méditerranéen, *Microtropis fallax* (Celastraceae), élément actuel de la forêt sempervirente à larges feuilles du Viêt-Nam mais sous sécheresse estivale, est considéré comme un des précurseurs des groupements sclérophylles méditerranéens.

Le domaine sud-méditerranéen différait avec des environnements ouverts, subdésertiques (à *Lygeum*, *Calligonum*, *Neurada*, *Nitraria*, *Ziziphus*), où *Avicennia* persista jusqu'au Pliocène inférieur avant l'invasion généralisée par les steppes à *Artemisia*.

Par exemple, en Camargue, l'expansion des xérophytes méditerranéennes est intervenue plus de 2 000 ans avant les premiers signes d'activité anthropique, apportant un nouvel argument dans le débat sur le rôle respectif du climat et de l'action humaine dans leur récente expansion qui, comme pour les steppes, peut être due d'abord au climat avant d'être confortée par la pression anthropique.

L'évolution climatique déduite des flores polliniques a connu trois phases majeures (fig. 1-3) :

- du Miocène au début du Pliocène supérieur (23–3,37 Ma), un certain rythme climatique à saison sèche (avec des variantes selon l'âge et la situation géographique) était installé dans un contexte tropical à subtropical à faible saisonnalité thermique ;

- la période 3,37–2,6 Ma est une phase de transition où le rythme saisonnier méditerranéen (sécheresse estivale et froids hivernaux) a prévalu ;

- les glaciations de l'hémisphère nord, mises en place à 2,6 Ma, généralisèrent la sécheresse et le froid au nord du bassin méditerranéen avec des saisons très contrastées tandis que les interglaciaires étaient plus doux et plus humides ; au sud du bassin, les différences entre glaciaires et interglaciaires étaient moins marquées.

Les quantifications confirment l'existence dès le Miocène moyen d'un gradient latitudinal peu marqué en température mais fort en sécheresse-humidité. Peu après, le gradient thermique latitudinal commença à tendre vers sa valeur actuelle tandis que le gradient sécheresse-humidité s'atténuait quelque peu.

■ J.-P. Suc¹, J.-P. Saint Martin², S. Saint Martin², S.-M. Popescu³, S. Fauquette⁴

¹Sorbonne Universités, UPMC Univ. Paris 6, CNRS, Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), Paris.

²UMR 7207, Muséum National d'Histoire Naturelle, Dépt. Origine et Évolution, Paris.

³GeoBioStratData Consulting, 69 Rillieux la Pape.

⁴ISEM, CNRS, Univ. Montpellier, IRD, EPHE, Montpellier.