

Photo : D. Nery.



Photo 1 : vue générale du site à empreintes de Vertébrés de Saignon - Numérotation des dalles, les numéros des bancs correspondants sont entourés d'un cercle.

- d1 : banc 1,
- d2 : banc 3,
- d3 : banc 13,
- d4 : banc 23,
- d5 : banc 26,
- d6 : banc 32.

INTERPRÉTATION SÉDIMENTOLOGIQUE ET STRATIGRAPHIQUE DU SITE À EMPREINTES DE PAS DE VERTÉBRÉS DE SAIGNON (VAUCLUSE)

Denise NURY* et Gilles CONESA**

INTRODUCTION

L'article qui suit est le résumé d'une étude plus complète réalisée à la demande de la Réserve naturelle géologique du Luberon.

Dans une ancienne carrière d'extraction de pierres pour dallages, affleurent des niveaux calcaires portant des centaines d'empreintes de pas fossilisées de mammifères et d'oiseaux se superposant ou s'organisant en pistes.

Celles-ci ont permis la définition de nouveaux ichnogènes et ichnoespèces : *Ronzotherichmus voconcense*, empreinte très fréquente à trois doigts, attribuée à un Rhinocérotyridé (*Ronzotherium*) dont des éléments du squelette ont été trouvés par ailleurs à quelques kilomètres de là, dans la carrière d'argile de Viens, *Bifidipes velox*, empreinte à deux doigts assez fréquente attribuée à des herbivores tragulidés. Les carnivores sont représentés par une seule marque conservée à l'Université de Lyon, *Sarcotherichmus enigmaticus*. Les empreintes d'oiseaux sont abondantes sur les niveaux supérieurs. Certaines sont palmées, d'autres ne le sont pas : *Pulchravipes magnificus*. L'unique trace *Keckia punctata*, conservée également à l'Université de Lyon, est certainement le fait d'un mollusque gastropode.

Ces découvertes justifient le classement du site en Réserve naturelle en 1987, en même temps que 27 autres gisements paléontologiques du territoire du Parc.

En tant que gestionnaire de la Réserve naturelle géologique du Luberon, le Parc avait envisagé d'édifier un bâtiment couvrant les surfaces à empreintes

afin d'assurer leur protection contre un éventuel vandalisme mais surtout contre l'érosion due aux intempéries.

La couverture de ce site aurait permis également de l'aménager pour y accueillir le public, c'est-à-dire d'y créer un cheminement donnant toutes les informations nécessaires à la compréhension globale du site. C'est dans cet objectif qu'une étude nous a été confiée, demandant d'interpréter les données scientifiques d'ordre sédimentologique et stratigraphique pour une présentation *in fine*, au public.

Le coût de l'opération dépassant très largement le budget disponible, le projet de couverture et d'aménagement du site a été momentanément abandonné. Toutefois, afin de le protéger à court terme des intempéries, il a été recouvert d'un géotextile ainsi que d'une épaisseur de 50 cm de sable et de tout-venant.

Le site à empreintes de pas de vertébrés se situe au nord de la montagne du Luberon, en bordure de la Route nationale 100, à 4 km d'Apt vers l'Est et sur le territoire de la commune de Saignon.

Le site étudié se présente sous une forme d'amphithéâtre ouvert au nord avec un flanc ouest et un flanc est, et montrant plusieurs gradins ou dalles principales (ph. 1).

* Géologue, Docteur ès Sciences,
Maître de conférences honoraire à l'Institut universitaire de formation des Maîtres de l'Académie d'Aix-Marseille.
Chemin du Braou, 13390 AURIOL

** Géologue, Maître de conférences, Centre de sédimentologie et de paléontologie, UPRESA 6019 du CNRS, Université de Provence, 3, place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3.

Il est particulièrement remarquable du fait de la présence de très nombreuses empreintes de pieds de vertébrés mammifères et oiseaux.

Les études géologiques ont pour ambition de reconstituer les différents visages de la planète Terre aux époques révolues, c'est-à-dire d'imaginer, avec plus ou moins de certitude selon les lieux et selon les époques, la paléogéographie.

Dans cette perspective, on met en pratique le principe « causes actuelles/causes anciennes » qui veut que l'on puisse expliquer le passé à la lumière du présent. Aussi, tout au long de cette étude, nous établirons des comparaisons avec des milieux actuels connus, en particulier ceux de Camargue.

I - POSITION STRATIGRAPHIQUE

Les niveaux constituant le site à empreintes de Saignon appartiennent à la formation des Calcaires de Lafayette supérieurs, niveau de base de la série sédimentaire tertiaire oligocène de la région d'Apt-Forcalquier-Manosque (fig. 2). La stratigraphie de cette série est basée principalement sur les biozones de mammifères, complétées par les études des mollusques gastéropodes et des Charophytes (Cavelier *et al.*, 1984). Apostolescu & Guernet (1992) en ont étudié les ostracodes.

Cette série présente dans son ensemble un caractère continental marqué épisodiquement par des incursions d'eaux salées d'origine marine (Nel *et al.*, 1987; Lesueur, 1991; Apostolescu & Guernet, 1992).

Les Calcaires de Lafayette supérieurs sont attribués au Rupélien (ex. Stampien) inférieur grâce à la présence d'une malacofaune abondante : *Brotia lauriae*, *Lymnea (Galba) longiscata*, *Nystia chastelli* (Cavelier, 1984; Cavelier *et al.*, 1984). Demathieu *et al.* (1984) et Lesueur (1991) reprennent cette attribution à leur compte.

L'âge de ces terrains est d'environ - 33 millions d'années.

II - LITHOLOGIE

La coupe est constituée de bancs de calcaires massifs, de calcaires en petits bancs, de lamines carbonatées et marneuses, de rares lits marneux (fig. 3, p. 94).

L'ensemble de la série est homogène mais présente des éléments remarquables : les roches elles-mêmes, des figures sédimentaires (rides et grandes rides), des fentes de dessiccation, des diaclases.

II.1 - Les roches du site

La série est essentiellement constituée de roches calcaires¹. On trouve cependant quelques niveaux argileux.

II.1.1 - Les roches calcaires

Les roches calcaires que l'on rencontre se rangent en deux catégories principales : le calcaire micritique et le calcaire à oncolithes².

1- **le calcaire micritique** d'aspect généralement compact et massif à l'œil nu, présente cependant localement des laminations ou feuilletage, ensemble de lits millimétriques plus ou moins soudés. En lame mince, on peut observer divers faciès.

On peut voir une **boue carbonatée** brune finement cristallisée (micrite) qui présente parfois des laminations ondulées, très discrètes (fig. 4, p. 96), et qui renferme divers grains dispersés de très petite taille : grains de boue, plus ou moins sphériques, de l'ordre de 200 μ , débris d'organismes, organismes, grains de sable (quartz), particules argileuses.

Une partie de la micrite a été produite par l'activité biologique de colonies de bactéries ou de cyanobactéries qui se développent au sommet du dépôt vaseux en le recouvrant d'un voile microscopique. Dans ce premier faciès, le voile est extrêmement ténu.

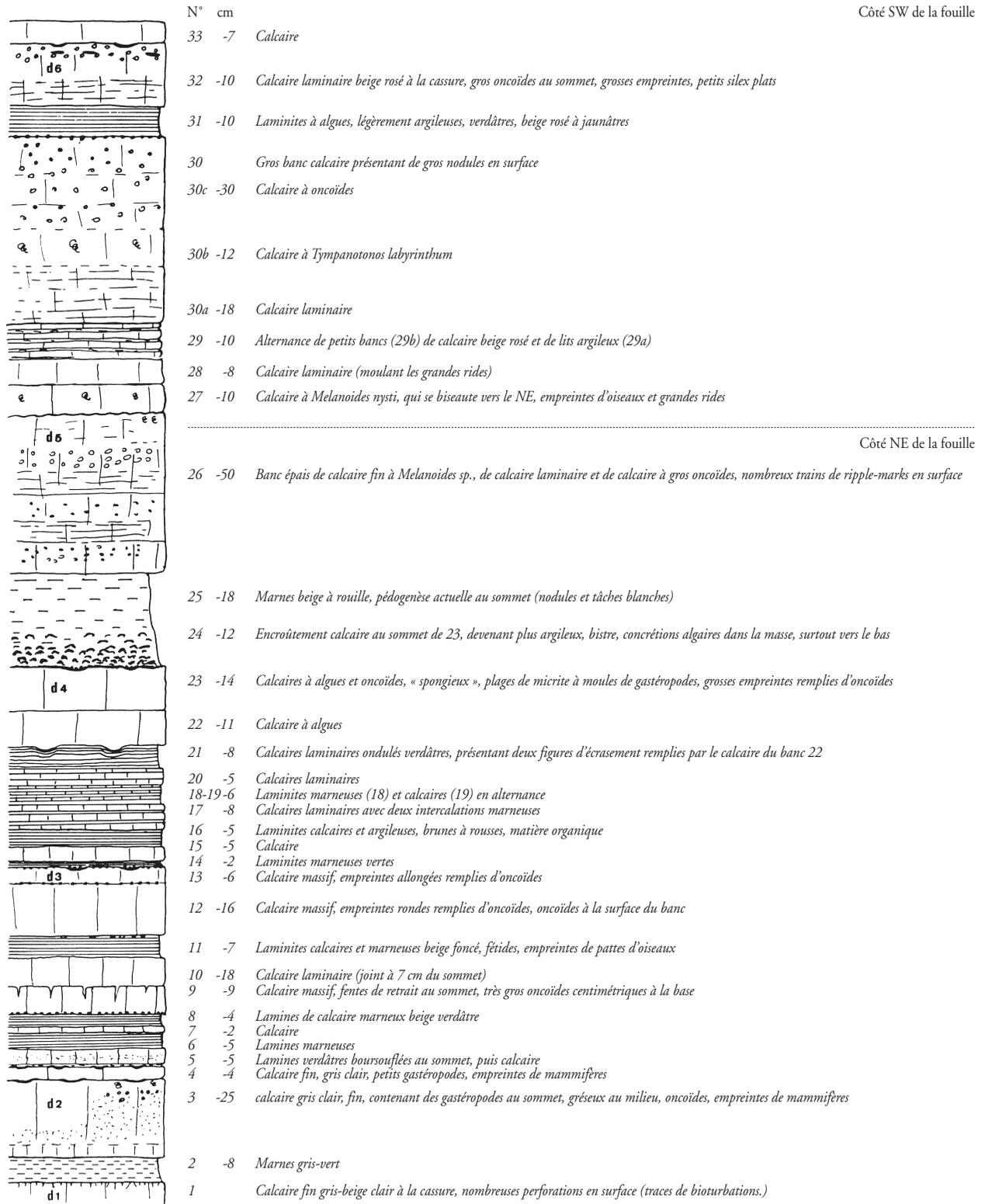
¹ L'étude des roches calcaires a été initiée par G. Camoin in Nury (1993).

² De très beaux pavés taillés dans des calcaires micritiques stromatolithiques ou à oncolithes peuvent s'observer dans la rue Paul Achard à Apt.

ÉPOQUES	ÉTAGES	APT	FORCALQUIER	MANOSQUE	Niveaux repères à Mammifères (FM)
OLIGOCÈNE	CHATTIEN			Marnes de la tuilerie de Manosque	(Richenbach) (Boningen)
		Calcaire de Reillane FM			
	RUPÉLIEN (STAMPIEN) supérieur	Marnes de Viens FM	Calcaire de Sigonce FM	Laminites bitumineuses	Antoingt Heimersheim
		Calcaire de Vachères FM Marnes de Caseneuve Calcaire de Campagne-Calavon FM			Les Chapelins
		Marnes de Pradengue	Marnes du Revest	Marnes de la Mort d'Imbert	
		Calcaires de Lafayette supérieurs	Formation détritique inférieure FM	Formation anhydritique	Ronzon
Calcaires de Lafayette inférieurs	Formation salifère Marnes infrasalifères	Montmartre			
EOCÈNE terminal	LUDIEN supérieur et moyen	Marnes à gypse de Gargas Calc. à <i>Cyrena dumasi</i> Lignite de la Débruge FM			La Débruge

Fig. 2 : corrélations stratigraphiques schématiques de l'Éocène terminal et de l'Oligocène des séries d'Apt-Forcalquiers et Manosque (modifié de Cavalier et al., 1984).

Fig. 3 : coupe lithologique du site - (dessin D. Nury, 1993).



Mais le plus remarquable est que l'on observe très souvent des tapis stromatolithiques d'environ 0,5 mm d'épaisseur constitués par une alternance très nette de lits clairs et de lits sombres (fig. 5, p. 96). Ces tapis sont édifiés par un voile microbien beaucoup plus important formé de filaments dressés ou couchés.

Ces voiles se développent au fil des jours et se superposent pour constituer parfois des lamines visibles à l'œil nu. L'activité de ces organismes chlorophylliens produit du carbonate de calcium qui les emprisonne, les fossilise et indure le tapis qui se transformera avec le temps en roche, ce qui donne les lamines calcaires.

La formation des lamines alternantes claires et sombres est classiquement attribuée au rythme jour/nuit (voir Chamley, 1987). Durant le jour, les filaments cyanobactériens sont dressés, probablement en raison de leur activité photosynthétique et par phototropisme positif. Ils peuvent ainsi piéger des grains détritiques qui toutefois ne comblent pas tout l'espace. De ce fait, ultérieurement, les vides résiduels ont été remplis par de la calcite en gros cristaux ($> 20 \mu$), qui donne aux lamines une teinte claire. La nuit, les filaments se couchent et sont recouverts de boue fine carbonatée constituant ainsi des lamines sombres.

Les tapis stromatolithiques peuvent être désorganisés aux échelles microscopique (fig. 5, p. 96) et macroscopique : certaines surfaces de bancs montrent des copeaux de tapis centimétriques (fig. 6, p. 96).

De très beaux tapis microbiens se développent dans les lagunes de Camargue. Lorsque le niveau de l'eau baisse, des tapis peu épais (2 à 3 cm) se déchirent par dessiccation, les bords des déchirures se roulent (fig. 7, p. 96). Parfois, de fins copeaux se détachent et sont emportés au moment de la remise en eau.

Les microorganismes qui les composent sont en grande partie des bactéries et cyanobactéries mais aussi des frustules de diatomées en grande abondance.

2 - le **calcaire à oncolithes** semblable au précédent mais présentant en outre des sphérules microscopiques ou visibles à l'œil nu.

Les oncolithes, de forme sphérique, de diamètre quasiment toujours inférieur au centimètre, sont constitués de couches concentriques de carbonate de calcium entourant un noyau central de nature quelconque

(grain minéral, débris de coquille,...). Ils sont dus à l'activité des voiles microbiens qui se fixent sur le noyau. Les cyanobactéries forment ainsi par leurs filaments serrés et rayonnants (fig. 8, p. 96) des lamines stromatolithiques (fig. 9, p. 96).

Ces sphérules se forment dans des milieux aquatiques agités par des courants ou des vagues. Du fait de l'agitation, les grains roulent et pourront ainsi être recouverts par les lamines cyanobactériennes calcaires d'une manière homogène et régulière.

Donc, l'alternance des lits de calcaire micritique et de calcaire à oncolithes permet de penser que le milieu sédimentaire était alternativement très calme ou plus agité en fonction de variations saisonnières dans le régime des vents et/ou des courants et de la pluviosité.

II.1.2 - Les roches marneuses

Bien que la série soit essentiellement constituée de calcaires en bancs durs et saillants, on observe des niveaux plus tendres, généralement en retraits, dénommés « laminites marneuses », « marne beige à rouille »... Dans l'ensemble de la coupe, les niveaux marneux sont peu épais. Le banc 25, épais de 18 cm représente le seul épisode d'apport argileux un peu plus important dans cet environnement carbonaté. On note la présence de 2 niveaux fétides (banc 11) ou renfermant de la matière organique (banc 16).

En général les sédiments argileux proviennent de l'érosion de reliefs environnants cristallins (granite, basalte, micaschiste...) ou sédimentaires argileux. Les minéraux sont transportés par les eaux de ruissellement ou les cours d'eaux jusqu'à l'aire sédimentaire où ils décantent. Leur présence est l'indice d'une activité plus intense des eaux de surface sur les reliefs, soit à cause d'une surélévation de ces derniers consécutive à des mouvements de l'écorce terrestre (tectoniques), soit à la suite de la dégradation du couvert végétal au cours par exemple d'une période aride.

On peut donc conclure qu'à cette époque les précipitations étaient peu importantes, que la végétation filtrait les apports argileux (il suffit d'une couverture herbeuse pour cela) et que les mouvements tectoniques ne devaient pas être très violents.

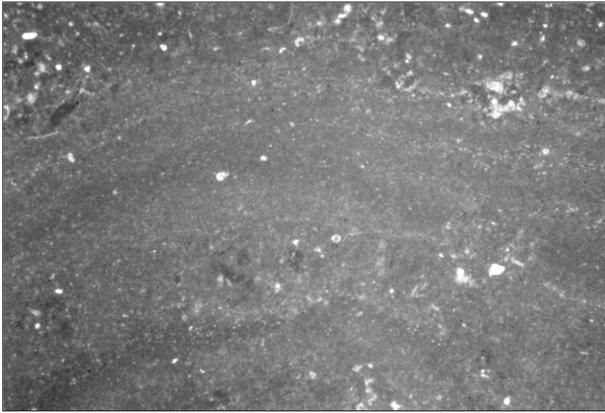


Fig. 4 0,5 mm



Fig. 7

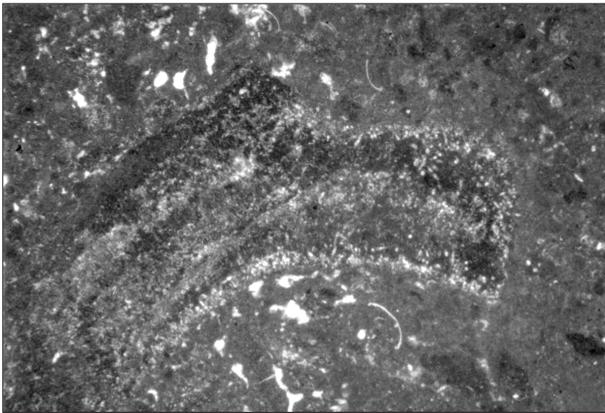


Fig. 5 0,1 mm

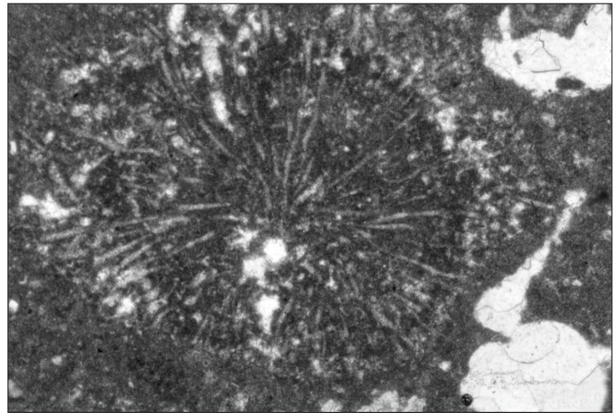


Fig. 8 0,5 mm

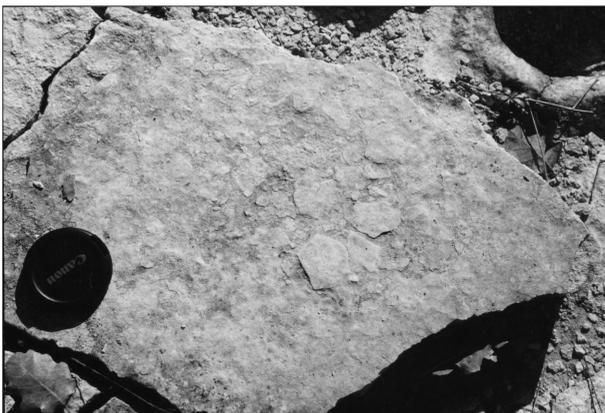


Fig. 6

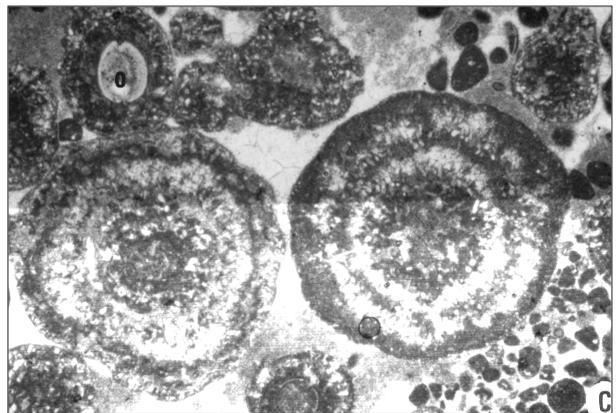


Fig. 9 1 mm



Fig. 10

Fig. 4

calcaire micritique laminé. Les laminations sont soulignées par des horizons de micrite plus dense donc plus foncée. Des débris surtout minéraux (grains de quartz anguleux) se situent surtout dans le haut de la photo. (photo G. Camoin in Nury, 1993).

Fig. 5

fragment de tapis stromatolithique remanié dans un calcaire micritique à débris d'Ostracodes. (photo G. Camoin in Nury, 1993).

Fig. 6

surface de banc présentant des copeaux de tapis stromatolithique. (photo J.-P. Saint-Martin).

Fig. 7

lagune de Camargue : le tapis microbien se déchire par dessiccation. (photo D. Nury).

Fig. 8

oncolithe à microstructure radiaire. les filaments cyanobactériens divergent à partir du centre, édifiant une « pelote microbienne » constituée de micrite filamenteuse. (photo G. Camoin in Nury, 1993).

Fig. 9

oncolithes constitués d'une alternance de lamines sombres et de lamines claires. Le nucléus du petit oncolithe en haut et à gauche de la photographie est un test d'Ostracode. (photo G. Camoin in Nury, 1993).

Fig. 10

rides symétriques et dissymétriques, sinueuses mais de directions globalement parallèles, à crêtes aplaties, recouvertes par une couche calcaire plane centimétrique.

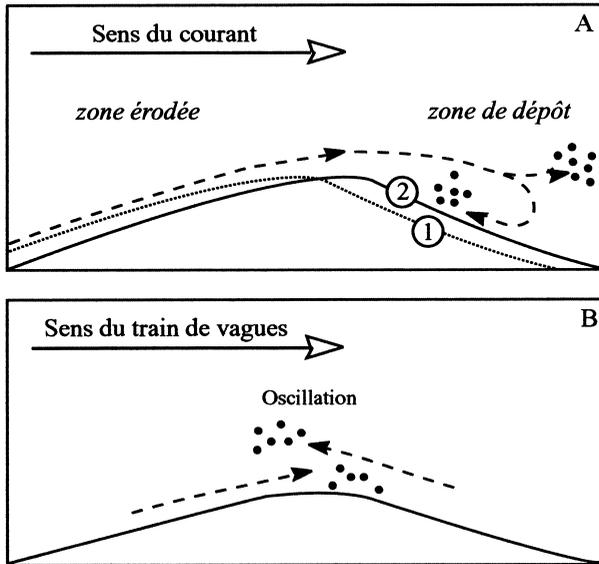


Fig. 11 : mécanisme de la formation des rides.

II.2 - Les figures sédimentaires

Les surfaces des bancs présentent des figures sédimentaires : des rides et des clapots et des grandes rides.

II.2.1 - Les rides et les clapots

On peut observer à la surface de certains bancs, des rides (ou ripple-marks), ondulations allongées, sinueuses, en relief, de 1 à 2 cm de hauteur. Elles peuvent être symétriques ou asymétriques, à crête aiguë ou aplatie. Sur une même surface l'orientation des rides est la même (fig. 10).

De telles rides se rencontrent fréquemment dans l'actuel, modelées dans du matériel sableux, sur les plages marines ou fluviales (fig. 11).

Elles sont la conséquence du remaniement des grains de sable par le mouvement des vagues ou l'action des courants. L'eau animée d'une vitesse suffisante par le courant (fig. 11 - A) développe assez d'énergie pour déplacer les grains de sable qui se déposent un peu plus loin dès que la vitesse diminue un peu. Les vagues, elles, (fig. 11 - B), mouvements oscillatoires, reproduisent ce mécanisme alternativement dans un sens puis dans l'autre. Le sens du mouvement de l'eau est perpendiculaire à la direction moyenne des rides.

Les crêtes, normalement aiguës, peuvent être aplaties après avoir subi une légère érosion.

Ces rides se forment sous l'eau et persistent en surface lorsque le niveau de l'eau baisse.

Dans ce site, les sédiments calcaires micritiques ou à oncolithes contenant des grains de taille variable se comportent comme des sables très fins puisqu'ils donnent naissance à des rides.

En mesurant la hauteur des rides et leur espacement, en calculant certains rapports que l'on compare aux valeurs obtenues à partir des rides actuelles étudiées dans toutes sortes de milieux et sur des sédiments de granulométrie variée, on peut dire que toutes les rides symétriques du site sont dues aux vagues. La plupart des rides dissymétriques ont été remodelées par les vagues.

Les trains de rides sont globalement assez parallèles. De plus, leurs directions légèrement variables sont très voisines : N 0°, N 150°, N 163°, N 165°. Ce fait signifie que les directions des trains de vagues qui les ont engendrés ont peu varié aussi, de N 60° à N 90°, de même que les directions des vents qui les ont créées : il y avait donc des vents dominants dans la région en provenance du secteur W-SW.

On note la présence de figures de clapot à l'extrémité sud-ouest de la dalle d5. Les trains de rides s'entrecroisent et constituent des losanges. On peut en déduire que la tranche d'eau était très faible et que le sédiment très fin pouvait être façonné par des trains de vagues faibles et de directions perpendiculaires, comme s'il s'agissait d'un ressac.

Globalement la taille des rides est plus importante vers le Sud-Ouest que vers le Nord-Est. Cela signifie que l'énergie des mouvements de l'eau qui leur a donné naissance était plus faible dans cette dernière direction. Si l'énergie est plus faible alors que le courant est le même, on peut penser que la tranche d'eau était aussi plus faible. On peut donc alors, situer le rivage vers le Nord-Est.

Les trains de rides ne sont d'ailleurs pas tous contemporains. Ils affectent des lits de calcaires micri-

tiques à laminations différents, lits centimétriques ou infra centimétriques qui constituent le banc. Ils sont recouverts par d'autres calcaires laminaires (fig. 10).

Nous retrouvons de telles figures dans les lagunes asséchées de Camargue où il est courant d'observer à la surface des tapis des rides figées par un fin voile microbien.

II.2.1 - Les grandes rides

Les dalles d2 et d5 présentent localement des grandes rides, c'est-à-dire des ondulations métriques.

Les 2 grandes rides de la dalle d2 ont une orientation N 110°. Elles délimitent entre elles un sillon qui mesure environ 4 m de longueur, qui s'ouvre vers le Nord et s'amortit vers le Sud. Leur hauteur est d'environ 10 cm, la distance entre les deux sommets arrondis est de 1,50 m. Elles affectent le banc 3 et 4 et sont recouvertes par le banc 5 qui les moule.

Au nombre de 3, les grandes rides de la dalle d5 délimitent entre elles deux sillons. Elles mesurent 3 à 5 m de long. Leur hauteur est d'environ 10 cm, la distance d'un sillon à l'autre est de 1,65 à 1,90 m.

Les rides sont légèrement sinueuses, leur orientation variant de N 70° (NE) à N 90° (SW). les sillons s'amortissent vers le Nord-Est. Leur surface est bosselée.

Vers l'amont des sillons, de grosses tâches grises montrent de très gros oncolithes.

Sur la tranche du banc 30 (fig 12), on peut observer des joints de stratification obliques délimitant des bancs secondaires dont l'épaisseur diminue du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Le calcaire à oncolithes qui constitue la partie Sud-Ouest de ces bancs passe vers le Nord-Est à un calcaire micritique laminaire. Il s'agit probablement de grandes rides vues en coupe transversale, le matériel le plus grossier se trouvant dans la partie la plus épaisse.

De telles morphologies ne peuvent pas être d'origine tectonique, c'est-à-dire consécutives à des mouvements de l'écorce terrestre créant des plis, car elles sont très localisées et recouvertes par des couches horizontales.

En effet, les grandes rides affectent le banc 27 et sont recouvertes par le banc 28 (fig. 13, p. 100).

Les lagunes de Camargue nous montrent de telles structures parallèles au rivage, émergées ou non en fonction des fluctuations de l'eau dans la lagune. Elles sont la conséquence du remaniement des vases par les mouvements de l'eau qui développent beaucoup plus d'énergie que ceux qui forment les petites rides, en eau plus profonde.

À la lumière de toutes ces observations, on peut penser que les grandes rides de Saignon se sont constituées dans une lagune à sédimentation calcaire dont la vase pouvait être, à certaines périodes, remaniée parallèlement au rivage. Des assèchements importants permettaient très rapidement la transformation (lithification) du sédiment en roche. Au cours d'une nouvelle mise en eau progressive, ces morphologies étaient recouvertes d'une manière discontinue par de nouveaux sédiments.



Photo : Hervé Vincent.

Fig. 12 : tranche du banc 30 montrant des stratifications obliques.

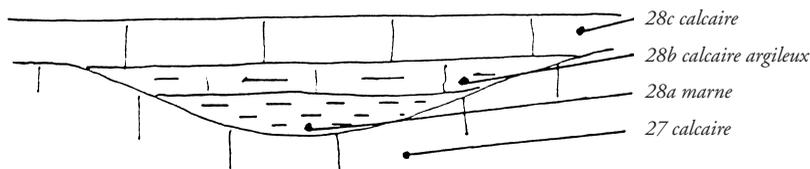


Fig. 13 : coupe du sommet d'une grande ride recouverte par un banc horizontal (in Nury 1993).

La différence de direction des grandes rides entre la dalle d2 et la dalle d5 montre probablement une variation dans la direction locale du rivage.

La présence d'empreintes d'oiseaux aquatiques sur le banc 27 (voir ci-dessous § III.2) et les boursouflures observées sont probablement dues au fait que des oiseaux aquatiques marchaient sur les grandes rides en les affouillant avec leurs becs pour trouver leur nourriture, comme en Camargue.

II.3 - Les fentes de dessiccation

Sur le banc 9, on peut observer des fentes de dessiccation (fentes de retrait) rectilignes, dessinant des figures à contour grossièrement polygonales. Elles sont remplies de calcaire. Dans la nature actuelle, les fentes de retrait se forment surtout dans des terrains argileux ou vaseux qui se dessèchent. Lorsque l'eau revient, ces fissures disparaissent généralement car l'argile gonfle à nouveau. Lorsque les fentes sont moulées, c'est souvent par un sédiment sableux qui arrive brutalement et les enfouit rapidement. Or, en Camargue, on peut observer que les fentes de retrait dans les tapis microbiens (fig. 14) épais ne disparaissent pas lorsque le niveau de l'eau remonte, probablement à cause de la texture compacte des tapis.

La présence de fentes de dessiccation dans des dépôts anciens est un argument irréfutable pour affirmer que ceux-ci ont été exposés au moins temporairement à l'air libre.

II.4 - Les diaclases

On observe quasiment partout sur le site un réseau de fractures plus ou moins rectilignes qui recoupent souvent plusieurs bancs. Ces fractures sont appelées diaclases.

Ces diaclases peuvent être fermées. Sur le site, elles sont souvent ouvertes du fait de la décompression suite à la mise à jour de l'affleurement (fig. 15).

Lorsque l'écorce terrestre bouge au moment de la formation des chaînes de montagnes les roches subissent des contraintes qui les brisent. Les directions d'orientations des cassures sont liées directement à la direction des forces qui se sont développées.



Fig. 14 : fentes de retrait polygonales dans des tapis microbiens assez épais en milieu vaseux (Camargue). On y voit une empreinte de pied humain.

Photo : D. Nury.



Fig. 15 : diaclases ouvertes et fermées à la surface d'un banc.

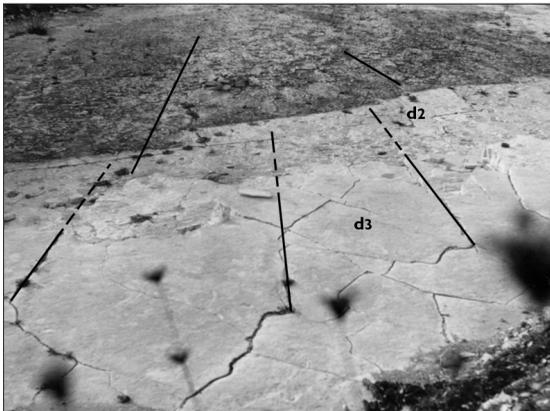


Fig. 16 : les dalles d2 et d3 montrent des directions voisines de fracturation.



Fig. 17 : diaclase recoupant une empreinte remplie d'oncolithes sans occasionner de déplacement.

D'un banc à l'autre les directions sont très voisines (fig. 16).

Les directions des fractures se répartissent de N 10° à N 170°, avec une plus grande fréquence entre N 30° et N 45°, N 60° et N 70°, N 95° et N 125°.

Par ailleurs, aucune des orientations n'est réellement prépondérante sur les autres pour organiser le réseau.

On ne note aucun déplacement, par exemple l'empreinte (fig. 17) est recoupée par une diaclase mais non décalée.

Il est donc impossible de rapporter ces diaclases à l'un ou l'autre des événements tectoniques majeurs survenus en Provence depuis l'Oligocène :

- la distension oligocène orientée E-W à WNW-ESE,
- la compression alpine orientée NNE-SSW à N-S.

Elles peuvent être la conséquence de la superposition dans le temps de toutes ces contraintes ou bien s'être formées au cours d'un seul de ces épisodes.

La dalle d2 présente tout un réseau de fracturations polygonales à contours sinueux. Elles ont une apparence de fentes de retrait à contours très sinueux. Mais il s'agit probablement de diaclases car, d'une part, les directions des côtés des polygones sont sensiblement les mêmes que celles des diaclases des autres dalles (fig. 16), et d'autre part, ces fracturations intéressent plusieurs bancs. De plus, une grande diaclase sinuose traverse la dalle d2 d'Est en Ouest sur toute sa longueur.

On peut toujours avancer l'hypothèse que la diaclatisation consécutive à l'impact de contraintes postérieures à la lithification, dans la dalle d2, s'est superposée en partie aux fentes de retrait originelles qui représentaient autant de zones de fragilité. Mais on sait, par ailleurs, que, dans l'ensemble, les calcaires de type travertineux (dont font partie les calcaires microbiens) enregistrent très mal les cassures. Peut-être faut-il voir dans tout ou partie des sinuosités une conséquence des propriétés mécaniques des calcaires microbiens.

III - LES EMPREINTES

On peut observer des empreintes de deux types : empreintes de mammifères et empreintes d'oiseaux.

III.1 - La formation et la conservation des empreintes de mammifères

La rareté de telles empreintes dans la nature pose le problème de leur formation et de leur conservation dans ce site.

Le plus souvent des empreintes sont portées par la grande dalle basale d2. Ces empreintes présentent un bourrelet périphérique (fig. 18). En section verticale, ce bourrelet montre des laminations visibles à l'œil nu. Au microscope, on peut vérifier qu'il s'agit de tapis stromatolithiques composés d'un feuilletage de tapis microbien (Saint-Martin, 2000).

Au sommet de la coupe (bancs 32-33-34), on peut observer des empreintes sans bourrelet dans des calcaires laminaires à gros oncolithes.

Dans les lagunes de Camargue, après une période d'assèchement assez prolongée (chaleur, mistral), il est possible d'observer sur les grèves exondées, des empreintes de pas humains qui ont déformé le tapis microbien spongieux en y creusant une dépression soulignée par un bourrelet (fig. 19). Les fentes de dessiccation qui affectent le tapis microbien recoupent le bourrelet; elles sont donc postérieures à la formation des empreintes. Lorsque l'on marche à côté de telles empreintes, il ne s'en forme plus, car le tapis trop desséché n'est alors plus déformable.

En se déplaçant sur les rivages de ces lagunes, on peut constater que selon les zones, le voile microbien est plus ou moins humide, plus ou moins épais et par conséquent plus ou moins résistant et plus ou moins fendu. La trace de nos pas est alors profonde ou peu marquée, parfois inexistante (fig. 7).

Par ailleurs, des traces de pas dans de la boue gorgée d'eau présentent des formes quelconques et seront probablement détruites quand l'eau reviendra.

Il semble possible d'affirmer que les types d'empreintes de la dalle de Saignon n'ont pu se réaliser et se conserver que dans des tapis microbiens épais ayant déjà acquis une certaine consistance grâce à un assèchement modéré, mais encore suffisamment gorgés d'eau pour être déformés et conserver la déformation.

Certaines « empreintes » de forme bizarre, que l'on ne peut attribuer à un quelconque animal, sont remplies d'oncolithes plus ou moins gros (fig.17).

On peut imaginer deux hypothèses :

- soit la cuvette formée a joué le rôle d'un réceptacle dans laquelle les faibles mouvements de l'eau ont favorisé la formation d'oncolithes,
- soit, ces granules formés ailleurs, s'y sont accumulés après avoir été transportés par le courant.

Peut-être les deux phénomènes se sont-ils produits en même temps!

III.2 - Le rivage et les empreintes d'oiseaux

Les trois grandes rides de la dalle d5 passent latéralement à une surface plane légèrement inclinée, redressée vers l'Ouest. Rides et sillons s'amortissent vers le Nord-Est.

En se déplaçant vers le Nord-Est de la surface, on peut observer que les trains de rides passent également à des surfaces planes en s'amortissant progressivement.

Il semble que l'on soit en présence du passage d'une zone suffisamment profonde pour que l'impact des mouvements de l'eau soit sensible sur les sédiments (boues carbonatées) à une zone de rivage (estran)³ sur laquelle se développaient des calcaires laminaires.

Sous cet estran calcaire, par écaillage des couches, on peut apercevoir des petits trains de rides. Ceci veut dire

3. On appelle estran la portion d'un littoral comprise entre les plus hautes et les plus basses eaux.



Fig. 18A : Bifidipes velox, empreinte à deux doigts.
Ces deux empreintes sont cernées par des bourrelets.



Fig. 18B : Ronzotherichnus voconcence, empreinte à trois doigts.

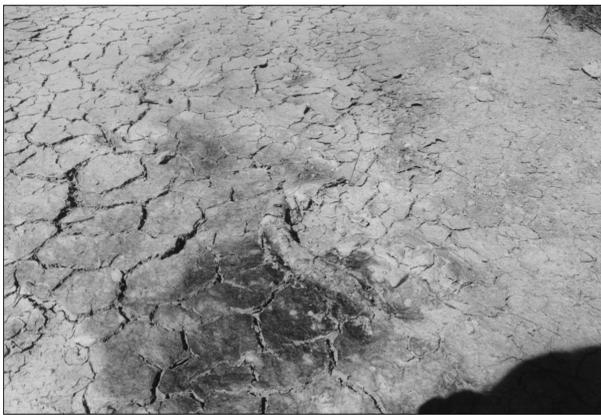


Fig. 19 : empreinte de pied humain avec bourrelet sur un fond de vase à tapis microbien desséché présentant des fentes de dessiccation en Camargue.



Fig. 20 : empreinte de patte d'oiseau.

que lors d'un stade précédent de sédimentation, la tranche d'eau s'était épaissie et le rivage s'était déplacé vers le Nord-Est.

Ces observations permettent de penser que le sommet de la dalle 5 (banc 26), porte en lui des indices significatifs d'une zone de rivage fluctuant sur laquelle les oiseaux échassiers ont laissé leurs empreintes (fig. 20).

IV - LES FOSSILES

Un fossile est un reste d'être vivant, entier ou sous forme de débris, visible à l'œil nu ou microscopique. Parfois ce sont seulement des empreintes de leurs corps ou de leurs traces de vie.

Dans l'ensemble les bancs de cette série sont azoïques⁴. On note cependant très localement la présence de gastéropodes, visibles à l'œil nu, des macro-fossiles.

Des microfossiles visibles à la loupe ou au microscope, des ostracodes et des foraminifères, ont été isolés par lavages d'échantillons prélevés dans les petits

4. C'est-à-dire qu'ils ne livrent pas de fossiles.

lits marneux (2, 6, 11, 25, 28 a, 31). On les retrouve également dans les lames minces de calcaires par observation au microscope.

Les traces de vie sont représentées par les empreintes mais aussi par des bioturbations c'est-à-dire, des perforations faites par certains êtres vivants fouisseurs, petits vers ou petits crustacés, qui creusent des galeries dans un sédiment pour se nourrir de la matière organique qu'il contient ou pour s'y abriter. On peut les observer dans les lames minces mais aussi macroscopiquement. En effet, le banc1 montre une surface supérieure criblée de petits trous.

Ce phénomène ne se produit qu'en milieu sédimentaire calme, c'est-à-dire peu remué par les vagues et les courants.

Certaines lames minces montrent des pelotes fécales c'est-à-dire des excréments d'animaux, probablement des petits crustacés, oblongues pour la plupart.

IV.1 - Les macrofossiles

Les macrofossiles sont des moules externes de mollusques gastéropodes : Hydrobies, *Melanoides sp.*, *M. nysti*, *Tympanotonos margaritaceus*. Ces formes de gastéropodes trouvées dans le site confirment l'âge oligocène de la série.

Les Hydrobiidés habitent sur les plantes des eaux calmes saumâtres.

Les *Melanoides*, appartenant au groupe des Melaniidés, sont surtout répandus dans le nord de l'Afrique, la Mésopotamie et l'Asie tropicale. Ce sont des espèces lagunaires pour la plupart. On trouve cependant certains genres dans des lacs et des chenaux fluviaux.

Les *Tympanotonos*, appartenant au groupe des Potamidinés, vivent actuellement dans les zones tropicales et méditerranéennes chaudes, peuplant les milieux à salinité variable laguno-lacustres ou fluvio-marins (deltas, estuaires).

Tous ces gastéropodes aquatiques se fixent et se déplacent sur la végétation chlorophyllienne aquatique et s'en nourrissent. Ils vivent donc à quelques exceptions près, sous une très faible tranche d'eau, de l'ordre du mètre, dans un courant faible ou nul. Ce sont des

animaux dits « euryhalins », c'est-à-dire, capables de supporter des variations très importantes de salinité. Ils se complaisent plutôt dans des eaux dont la salinité totale varie de 18 ‰ à 0 ‰ mais ils peuvent cependant temporairement supporter une certaine sursalure. On rappellera pour mémoire que la mer contient 30 à 35 g de sels par litre (35‰).

Tympanotonos fuscatus (unique représentant actuel du genre) vit dans l'Ouest-africain, dans les zones de mangroves, associé à des Melaniidés. Ces mollusques colonisent les berges inondables, les racines et troncs de palétuviers sur lesquels ils peuvent se fixer grâce à leur mucus à marée basse.

Ils broutent le voile microbien qui se développe sur le sol ou les feuilles tombées des arbres. Leur répartition est très assujettie au niveau de l'eau (hautes marées de vive-eau), à l'humectation du sol et à l'ombre qui permettent le développement de leur nourriture et les protègent contre le dessèchement.

Dans ces milieux laguno-fluviaux estuariens, des isolements temporaires ou permanents tendent à modifier les conditions de vie :

- Le confinement en période sèche et chaude occasionne la chute de la quantité d'oxygène dissous et l'élévation de la salinité.
- L'arrivée brutale de crues ou pluies cycloniques dessale la tranche superficielle des eaux, isolant une lentille d'eau salée en profondeur qui perd rapidement son oxygène par manque d'échange avec l'atmosphère. La turbidité des eaux de surface en diminuant l'activité photosynthétique accentue ce phénomène.

Dans ces deux exemples, on observe des hécatombes d'organismes et des accumulations de restes fossilisables. La variation de salinité traduit en fait la modification de tous les facteurs du biotope.

Les agressions par sursalure ou dessalure aux amplitudes irrégulières et au rythme variable soumettent les organismes vivant dans ces milieux à des stress très importants. Aussi, la plupart des formes, occupants temporaires, pénètrent dans ces milieux à la faveur d'immigrations saisonnières, y vivent pendant une durée limitée puis s'enfuient temporairement quand

les conditions de vie s'altèrent trop. Peu d'espèces arrivent à s'adapter et survivre, c'est le cas des Potamidinés et des Mélaniidés.

Ici les quelques rares bancs fossilifères quasiment monospécifiques contiennent très peu d'individus. Ceci veut probablement dire que les conditions de vie dans le milieu sédimentaire étaient tellement dures que même ces animaux très résistants ne pouvaient pas s'y développer.

IV.2 - Les microfossiles

Les microfossiles sont représentés par des ostracodes et des foraminifères

IV.2.1 - Les ostracodes

Les ostracodes sont des arthropodes de très petite taille, visibles à la loupe ou au microscope, possédant une carapace à deux valves. Ils peuplent tous les milieux aquatiques et peuvent résister à la dessiccation pendant plusieurs mois⁵.

Les lames minces montrent des ostracodes lisses à test très fins. Tous les résidus de lavages en ont livré, mais le niveau 11 est le plus riche. Les tests sont très concrétionnés et difficiles à identifier.

La forme la plus abondante semble appartenir au genre *Neocyprideis*. (dét. J.-F. Babinot). Quelques autres genres rappellent les genres de bordure marginale ou de milieux très côtiers.

L'ensemble indique un environnement très euryhalin, continental ou margino-littoral, très dur pour les êtres vivants (association monospécifique).

IV.2.1 - Les foraminifères

Les foraminifères sont des animaux unicellulaires qui possèdent un test le plus souvent calcaire. Ils peuvent vivre en pleine eau ou sur le fond.

Le niveau 25 a livré un foraminifère concrétionné indéterminable. Mais dans les lames minces, (Cazarely, 1998) il apparaît fréquemment des débris de petits foraminifères benthiques : des Textulaires, des Rotalines, des Miliolles, des *Ammonia*.

Ces formes côtières peuvent vivre dans les lagunes.

CONCLUSION

L'ensemble des informations données par la faune et la flore (cyanobactéries) montre que le milieu était de type estuarien constamment dessalé, très confiné, peu propice à la vie, subissant des variations très importantes de salinité et de teneur en oxygène, favorisant les bioturbations. Le climat était de type tropical aride.

V - SYNTHÈSE GÉNÉRALE

En rassemblant toutes les informations recueillies nous pouvons caractériser l'environnement sédimentaire qui a permis l'édification de la série à empreintes de Saignon.

* La série du site à empreintes de vertébrés de Saignon épaisse d'environ 4 mètres montre à la fois une grande homogénéité et une très grande variabilité dans les dépôts.

En effet, les faciès sont peu nombreux, tous de nature chimique carbonatée : calcaires micritiques compacts ou laminés, calcaires oncolithiques, laminites calcaires plus ou moins marneuses, marnes. Ce carbonate de calcium s'est formé principalement grâce à l'activité des cyanobactéries cholorophylliennes en milieu chaud.

La rareté du matériel détritique essentiellement argileux peut être la conséquence de plusieurs facteurs dont il est difficile de mesurer les impacts relatifs :

- le couvert végétal piégeait ce matériel sur les reliefs,
- les reliefs étaient trop éloignés pour qu'il puisse atteindre l'aire sédimentaire,
- le régime des précipitations était si faible qu'il ne pouvait être transporté.

5. Pour plus de détails sur ces organismes, le lecteur pourra se reporter à l'article de V. Apostolescu, dans ce même volume, p. 76 à 81 (NDLR).

Par contre, la succession de ces faciès est excessivement variable, ce qui traduit une grande variabilité de l'environnement sédimentaire.

* La faune observée montre que le dépôt de sédiment se réalisait dans un milieu lagunaire probablement en connexion temporaire avec le milieu marin (lacs lagunaires ou marais maritimes). Les eaux, toujours dessalées (milieu estuarien, mésohalin : 10 à 18‰ de salinité) pouvaient à certaines périodes devenir suffisamment douces au point que de gros mammifères venaient les boire. On remarquera l'absence d'organismes indiquant des conditions marines franches tout comme l'absence d'organismes caractéristiques de dépressions continentales, salées et fermées.

L'aire sédimentaire peu profonde subissait des variations importantes de bathymétrie. Les eaux se confinaient progressivement en devenant probablement impropres à la vie, allant jusqu'à l'émersion totale durant des périodes de dessiccation prolongées marquées par les fentes de retrait.

Les associations biologiques très appauvries (ostracodes à tests fins, peuplements de gastéropodes pauvres et quasiment monospécifiques), traduisent un milieu de vie restreint, soumis à de fortes variations de température et de salinité. La plupart du temps, seules les communautés microbiennes pouvaient y vivre. On a noté dans la coupe la présence de deux niveaux fétides (banc 11) ou renfermant de la matière organique (banc 16).

* La conservation des empreintes est probablement liée à une induration voire une lithification précoce des sédiments. On peut y voir l'influence des périodes de dessiccation prolongées et/ou de la nature même des sédiments encaissants, notamment les niveaux à stromatolithes. Ces derniers, à l'origine très visqueux, spongieux et facilement déformables sous les pattes d'un animal pesant quand ils contiennent encore une certaine humidité, ont la propriété de se lithifier très précocement.

* L'étude lithologique permet de caractériser l'aire sédimentaire et d'en montrer l'extrême variabilité : l'ouverture du bassin vers le Sud-Ouest, la présence des rides de vagues et de courants aux orientations quelque

peu variables montrant cependant l'existence de vents dominants, de grandes rides parallèles au rivage qui témoignent que sa localisation a varié de la base au sommet de la série.

Nous pouvons dire avec une quasi certitude que la série de Saignon s'est déposée dans un milieu lagunaire dessalé, très peu profond mais à la bathymétrie fluctuante, souvent asséché soumis à l'action de vents plus ou moins violents qui remaniaient les dépôts carbonatés en formant des rides ou des grandes rides selon la plus ou moins grande proximité du rivage, la force du vent ou la granulométrie du sédiment.

Les tapis microbiens s'y développaient d'une manière importante et les vertébrés, mammifères et oiseaux, qui vivaient dans cet environnement y laissaient leurs empreintes.

* Ce type de milieu sédimentaire est tout à fait compatible avec les connaissances régionales relatives à l'Oligocène.

Dans la formation des Calcaires de Lafayette, dans toute la région, les calcaires à cyanobactéries sont abondants et les influences chlorurées sont nombreuses. Ces influences salées d'origine marines se retrouvent également dans les milieux sédimentaires de nombreux niveaux de l'Oligocène de la région (Apostolescu, 1968; Nel *et al.*, 1987; Lesueur, 1991; Apostolescu *et al.*, 1992). Les conclusions auxquelles nous avons abouti sur le site de Saignon s'inscrivent dans un cadre régional et nous autorisent, pour expliquer la mise en place de la série, à faire appel aux connaissances actuelles sur la paléogéographie du Sud de la France au début des temps oligocènes (Nury, 1988).

En Provence méridionale, ce genre de milieu sédimentaire (contenant ou non des évaporites) se retrouve à plusieurs niveaux de l'Oligocène et là, au moins à certaines périodes, les relations avec une mer sont certaines. En effet, on trouve dans les séries oligocènes d'Aix-en-Provence et même à Céreste et Vitrolles, près d'ici, dans le Rupélien supérieur et le Chattien terminal, des Discalioïdes, « méduses » coloniales qui vivent actuellement à la surface de l'Océan indien et qui viennent s'échouer dans les lagunes côtières poussées par

les vents, des spores de dinoflagellés (formes appartenant au microplancton végétal marin) et, en fin de période, des « crevettes » Peneidés qui à l'heure actuelle, ne vivent que dans les eaux lagunaires et estuariennes tropicales. Pour que ces formes arrivent et se développent, une liaison directe avec la mer ouverte est nécessaire (Nel *et al.*, 1987).

Il est important de noter qu'un environnement sédimentaire analogue est décrit en Limagne à l'Oligocène,

à la limite Rupélien-Chartien (Bodergat *et al.*, 1999).

Dans la série de Saignon, plus ancienne (Rupélien inférieur) les restes rencontrés au caractère uniquement dessalé ne peuvent permettre, à eux seuls, de dire si l'ensemencement en espèces mésohalines s'est effectué par voie directe (arrivées courtes et épisodiques d'eaux salées d'origine marine) ou par apports indirects (cyclones, oiseaux aquatiques).

* Les dernières questions que nous nous poserons sont les suivantes : quelle était cette mer pourvoyeuse de chlorures et autres sels marins et de formes vivantes et où se trouvait-elle ? Par quel mécanisme les eaux salées ont-elles pu envahir cette région continentale ?

Lorenz *et al.*, 1993 (fig. 21) nous montre l'idée que les géologues se font de la paléogéographie au Rupélien supérieur. Nous voyons que la France fait partie d'un bloc continental qui englobe l'Espagne et la Corse-Sardaigne dans une position différente de leur position actuelle. Donc, un grand continent méridional appelé continent pyrénéo-corso-sarde, émergé, se dressait au large des côtes de la Méditerranée actuelle.

Dès le début de la période oligocène, une tectonique en distension étire la croûte continentale de toute l'Europe occidentale. Cette croûte se fracture le long de grands faisceaux de failles et de grands fossés se forment. Les plus méridionaux découpent le continent pyrénéo-corso-sarde et atteignent la mer, la Téthys ligure qui se situe au Sud, entre l'Europe et l'Afrique. Cette distension qui a commencé au Ludien supérieur et s'est amplifiée tout au long de l'Oligocène a creusé les fossés de plus en plus, permettant ainsi à la mer de pénétrer profondément dans les terres. À la fin de l'Oligocène, la Méditerranée occidentale s'installe définitivement sur les côtes de Carry-le-Rouet.

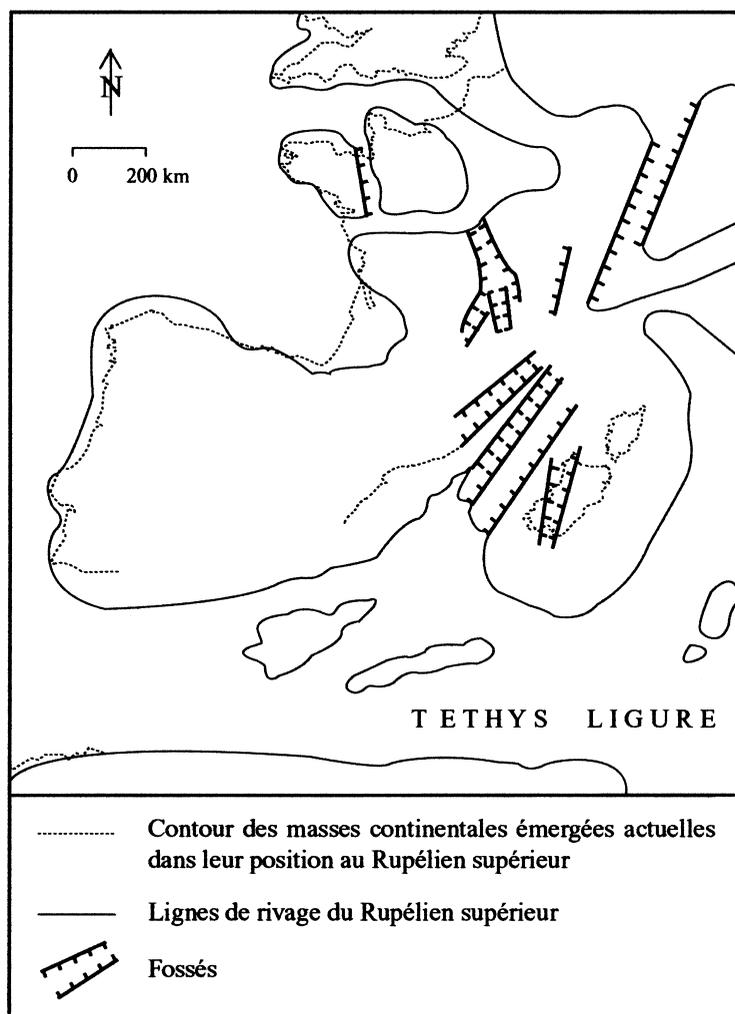


Fig. 21 : paléogéographie de l'Europe occidentale au Rupélien supérieur (-30 à -28 millions d'années (Lorenz *et al.*, 1993).

À cette époque où la Montagne du Luberon n'existait pas encore puisqu'elle n'a été érigée que plus tard, à la fin du Miocène, la région était sans doute très plate. Les eaux salées cheminaient à travers les fossés dont les parties affaissées étaient probablement très plates elles aussi. Elles finissaient par arriver dans notre région au cours des épisodes distensifs les plus intenses ou aux époques où le niveau de la mer était plus élevé (car il a varié au cours des temps géologiques). Ces eaux se mêlaient aux eaux douces créant un milieu saumâtre. Elles apportaient des germes et des spores d'animaux qui se développaient et se maintenaient d'autant plus difficilement, que le climat tropical aride qui régnait favorisait l'assèchement des espaces inondés.

Ensemencement direct, ensemencement par les cyclones? Bien que le climat ait été tropical, il ne nous semble pas que la Téthys ligure ait représenté une surface océanique suffisante pour permettre la formation de cyclones.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Christine Balme et Jean-Paul Saint-Martin pour leur contribution respective à la version définitive de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

APOSTOLESCU V., 1968, Reconstitution des conditions de sédimentation et des milieux de dépôt par les données sédimentologiques et paléobionomiques conjuguées. Exemple de l'Eocène-Oligocène de Forcalquier-Manosque (Basses-Alpes), *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Vol. 23/6, pp. 774-792, 1 pl.

APOSTOLESCU V. & GUERNET C., 1992, Les Ostracodes oligocènes de la région de Forcalquier-Manosque (Bassin continental d'Apt, Haute-Provence), *Revue de Micropaléontologie*, 35/2, p. 91-115, 16. fig, 3 pl.

BODERGAT A.-M., BRIOT D., HUGUENEY M., POIDEVIN J.-L., PICOT L., GIRAUD F., BERGER J.-P., LÉVY A. & POIGNANT A., 1999, Incursions marines dans l'environnement lacustre du rift oligocène de Limagne (Massif Central, France) : apport des organismes halophiles et des isotopes du strontium : datation par les mammifères, *Bulletin de la Société géologique de France*, t. 170, n° 4, p. 499-511.

CAZARELLY., 1998, *Étude du site à empreintes de Saignon*, Mémoire de maîtrise, Université d'Aix-Marseille 3, Faculté des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme (responsables de stage : J.-P. Saint-Martin, D. Nury & G. Conesa).

CAVELIER C., 1984, Descriptions régionales, Oligocène, in DEBRAND - PASSARD S. et al.. Synthèse géologique du Sud-Est de la France, *Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières*, Orléans, n° 125, pp. 399-403.

CAVELIER C. & ALABOUVETTE B., avec la coll. de CAUTRU J.-P., 1984, Montélimar-Manosque, Oligocène, in DEBRAND - PASSARD S. et al.. Synthèse géologique du Sud-Est de la France, *Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières*, Orléans, n° 125, pp. 421-425.

CHAMLEY H., 1987, *Sédimentologie*, Géosciences, Dunod Paris.

DEMATHIEU G., GINSBURG L., GUERIN C. & TRUC G., 1984, Étude paléontologique, ichnologique et paléocéologique du gisement oligocène de Saignon (bassin d'Apt, Vaucluse), *Bulletin du Muséum national d'histoire naturelle*, Paris, 4^e série, 6 Section C, n° 2, pp. 153-183.

LORENZ C., BUTTERLIN J., CAVELIER C., CLERMONTÉ J., COLCHEN M., DERCOURT J., GUIRAUD R., MONTENAT C., POISSON A., RICOI L.E. & SANDULESCU M., with collaboration : BARRIER P., BELLION Y., BENKHELIL J., BONNEAU M., BRAUD J., LATREILLE M., MARCOUX J. & MASCLE G., (1993), in DERCOURT J., RICOI L.E., and VRIELINK B. (eds.), *Atlas Téthys, Paleoenvironmental Maps*, Maps BEICP, FRANCLAB, Rueil-Malmaison.

LESUEUR J.-L., 1991, *Étude sédimentologique et stratigraphique du bassin paléogène d'Apt-Manosque-Forcalquier (Alpes de Haute Provence)*, Modalités de la transgression burdigalienne, Thèse de l'Université Michel Montaigne, Bordeaux III, 421 p.

NEL A, GILL G.A. & NURY D., 1987, Découvertes d'empreintes attribuables à des coelentérés Siphonophores chondrophorides dans l'Oligocène de Provence, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Paris, t. 35, Série II, pp. 637-641.

NURY D., 1988, L'Oligocène de Provence méridionale-Stratigraphie - dynamique sédimentaire, reconstitutions paléogéographiques, Thèse d'État, Université de Provence, (1987), *Documents du Bureau de recherches géologiques et minières*, Orléans, n° 163, 410 p., 120 fig, 37 tab.

NURY D., 1993, *Étude géologique du site à empreintes de Saignon (Vaucluse)*, Rapport géologique, Parc naturel régional du Luberon, Apt.

SAINT-MARTIN. J.-P., 2000, *Le rôle des organismes microbiens dans la sédimentation*, ARF DOCENDI, Coll. Géomédia, n° 1, Bucarest.