

Tome 70

fascicule 3

Mars 2001

Abonnement 190 F — Le numéro 25 F

ISSN 0366-1326

BULLETIN MENSUEL
DE LA
SOCIÉTÉ LINNÉENNE DE LYON

Siège social : 33 rue Bossuet, F 69006 LYON

Rédaction : P. BERTHET

Géologie de la « Pierre Dorée » des Monts d'Or et du Beaujolais (Rhône, France).

Bruno Rousselle

Polcy, 69470 RANCHAL

Résumé. - Une récente étude des structures sédimentaires de la pierre dorée des Monts d'Or et du Beaujolais (Rhône, France) a permis de préciser la nature et l'évolution du milieu de dépôt de cette série calcaire de l'Aalénien (Jurassique moyen) [Rousselle, 1997]. Cette région était située à l'époque au cœur d'une plate-forme sous-marine peu profonde où les sédiments calcaires, issus majoritairement de colonies de crinoïdes, étaient transportés et distribués par des courants de tempête et de marée. Les organismes fossiles témoignent d'un environnement aux accents tropicaux. La succession verticale des faciès de dépôt révèle l'existence d'alternances répétées des dynamiques de marée et de tempête, de variations de la profondeur d'eau et de crises de la production calcaire. Ces phénomènes sont en grande partie attribuables à des événements géodynamiques régionaux, notamment des mouvements tectoniques, mais aussi globaux, qui changent à de nombreuses reprises la géographie de la plate-forme au cours de l'Aalénien.

Mots clés. - Plate-forme sous-marine, courants sous-marins, tempêtes, marées, mouvements tectoniques, crises sédimentaires, sédiments calcaires, crinoïdes et entroques, Aalénien, Jurassique moyen, Monts d'Or et Beaujolais, Rhône, France.

Geology of the « Pierre Dorée » Formation in the Monts d'Or and Beaujolais area (Eastern France).

Summary. - A recent study of sedimentary structures of the « Pierre Dorée » Formation, in the Monts d'Or and Beaujolais area (Eastern France), gave precise information about nature and evolution of the depositional environment of this calcareous serie, related to the Aalenian stage (Middle Jurassic) [Rousselle, 1997]. At this time, the considered area was part of a shallow submarine shelf where carbonate sediments, deriving first from crinoidal colonies, were moved and distributed by storm and tidal currents. Fossil organisms show that environmental conditions were close to the tropical ones. Vertical succession of sedimentary features reveals recured alternations of both tide and storm systems, water depth variations, as well as rapid decreases of calcareous production. These phenomena were mainly caused by regional, especially tectonic motions, and global geodynamic events that changed frequently the shelf geography durind the whole Aalenian time.

Key words. - Submarine shelf, submarine currents, storms, tides, tectonic motions, sedimentary crises, calcareous sediments, Crinoids and ossicles, Aalenian stage, Middle Jurassic, Monts d'Or and Beaujolais area, Eastern France.

INTRODUCTION

La pierre dorée appartient indéniablement au patrimoine historique et culturel majeur des Monts d'Or et du Beaujolais. Elle a été l'objet d'un commerce florissant pendant des siècles, autour des métiers de carrier et de tailleur de pierre, et a été très largement employée pour façonner et construire d'innombrables objets et bâtisses en tout genre. Ces réalisations demeurent la fierté des habitants de cette région et for-

Accepté pour publication le 8 octobre 1998

Bull. mens. Soc. linn. Lyon, 2001, 70 (3).

ment un vrai livre à ciel ouvert pour tous les amateurs d'art et de minéral. L'attachement de ce pays à cette pierre est tel qu'un groupement de communes du Beaujolais méridional s'est même doté d'une appellation évoquant ce patrimoine et affichant cette fierté : le « Pays des Pierres Dorées ».

Mais la pierre dorée c'est aussi une histoire beaucoup plus ancienne, une histoire géologique, que depuis deux cents ans, des générations de géologues s'emploient à dévoiler. Aujourd'hui, la vision de cet ensemble calcaire a bien changé. Une approche dynamique des roches sédimentaires, basée sur la lecture et l'interprétation des structures de dépôt, est à l'origine de cette évolution. Ainsi, derrière l'uniformité apparente de la pierre dorée, se cachaient des souvenirs enfouis d'un lointain passé de notre Terre, où apparaissaient des paysages sous-marins variés et animés qui viennent désormais enrichir notre héritage géologique et paléontologique connu.

C'est ce petit maillon de la vaste et fabuleuse histoire de la Terre que j'entends évoquer ici, en tentant de raviver les principaux éléments du décor qui s'ouvrait sur les Monts d'Or et le Beaujolais à l'époque du dépôt des couches de la pierre dorée : l'atmosphère et son climat, la mer et le fond marin, la matière sédimentaire et les êtres vivants aujourd'hui fossilisés ou à jamais disparus.

Après avoir rappelé la place de la pierre dorée dans le paysage du Nord-Ouest de Lyon, je vous invite donc à partir à la quête de ce « monde retrouvé », situé quelque part sur les rivages tropicaux et peu profonds de l'océan Téthys au milieu de la période Jurassique.

I. LA PIERRE DOREE DANS LE PAYSAGE NORD-UEST-LYONNAIS

La pierre dorée, ou pierre de Couzon, est une composante incontournable des paysages des Monts d'Or et du Beaujolais. Sa texture granulaire, miroitante ou patinée, sa structure massive ou fracturée, sa couleur jaune orangé et la présence des silex blancs sont autant d'éléments familiers. Non moins familiers et émouvants sont les villages, les monuments et les carrières, habillés de pierre dorée, qui procurent à cette région ce caractère si original. Le calcaire jaune disparaît souvent sous un couvert végétal typique, formé pour une bonne part de chênes et de buis. Son inclinaison vers l'orient détermine, sur le flanc est des reliefs, une pente caractéristique d'une quinzaine de degrés en moyenne, et sur leur flanc ouest, un abrupt plus ou moins prononcé.

La constitution et l'aspect compact de la pierre dorée lui confèrent une relative résistance à l'érosion. C'est pourquoi, du fait également de son inclinaison et de l'existence d'un dense réseau de failles, on retrouve cette formation surplombant de vastes combes marneuses (marnes domériennes) et chapeautant bon nombre de collines et de promontoires des Monts d'Or, du Val d'Azergues et du Beaujolais : mont Thoux et mont Verdun ; butte de Glay ; arêtes de Saint-Jean-des-Vignes, de Lachassagne, de Theizé... Sa bonne cohésion et sa facilité d'extraction et de débitage sont les principales raisons de son intense exploitation depuis des temps reculés. Les Romains, certainement sans être les premiers, avaient déjà adopté la pierre jaune et avaient ouvert des carrières ou utilisé des affleurements naturels. Celle-ci avait notamment été employée pour la construction de l'aqueduc des Monts d'Or, en servant plus spécifiquement à recouvrir le canal proprement dit («lauzes» de pierre dorée).

Dans le Nord-Ouest Lyonnais, le nombre de carrières de pierre dorée, anciennes ou récentes, est considérable. Rien que dans le petit massif des Monts d'Or, on

dénombrer près de quarante sites d'extraction, abandonnés ou remblayés pour la plupart. Le Beaujolais méridional et le Val d'Azergues présentent aussi de très nombreux sites analogues. Quelques exploitations subsistent encore, ou subsistaient il y a peu, pour la production des moellons ou des granulats [carrières du Py et du Verdun (Monts d'Or) : carrières des Béliuses, de Marcy et de Jarnioux (Beaujolais)] ou pour la fabrication des ciments [carrières de Belmont (Beaujolais)]. De temps à autre, quelques tailleurs de pierre reviennent dans le Beaujolais façonner la pierre dorée pour le compte de bâtisseurs ou de rénovateurs locaux.

On retrouve l'équivalent de la pierre dorée, anciennement également très exploité, dans les monts du Mâconnais (premier éperon rocheux à la base de la Roche de Solutré), dans les monts du Tournugeois, du Charollais et du Châlonnais, soit en somme, sur toute une frange de la bordure orientale du Massif Central entre Lyon et Châlon-sur-Saône.

II. AGE, DIVISIONS ET CONSTITUTION DE LA PIERRE DOREE

1. Divisions du temps géologique et âge de la pierre dorée (fig. 1)

La série de la pierre dorée des Monts d'Or et du Beaujolais appartient à une couverture sédimentaire du début de l'ère Secondaire (Trias et Jurassique pour partie) qui recouvre un socle cristallin primaire. Dans le Secondaire, cette série occupe une position intermédiaire, au début du Jurassique moyen, plus précisément au niveau de l'étage Aalénien (du nom de la ville de Aalen, Allemagne, où se trouve la série de référence de l'étage). Selon des datations radiométriques récentes (obtenues par dosage d'éléments radioactifs présents dans les roches), l'Aalénien s'étendrait sur environ 4 millions d'années (Ma) et se placerait dans la fourchette -180 / -175 Ma.

| ERE | PERIODE | EPOQUES | ETAGES | SOUS-ETAGES | ZONES D'AMMONITES | Calcaire à Entroques Mts d'Or - Beaujolais | "Pierre Dorée" sifcio sensu | AGES en millions d'années avant l'Actuel | |
|------------|---------|---------|----------|-------------|-------------------|---|--------------------------------|--|-------|
| SECONDAIRE | | | BAJOCIEN | | | | | | |
| | | | AALENIEN | SUP. | Concavum | | | | ~ 176 |
| | | | | MOY. | Bradfordensis | | | | |
| | | | | | Murchisonae | | | | |
| | | | | INF. | Opalinum | | | | |
| | | | TOARCIEN | | | | | | |

Fig. 1 : Situation de la Pierre Dorée sur l'échelle des temps géologiques.

A l'heure actuelle en France, l'étage Aalénien est divisé en trois sous-étages et trois ou quatre zones d'ammonites selon les auteurs. Les ammonites (céphalopodes à coquille externe), utilisées pour la définition des divisions zonales de l'étage, appartiennent en majorité à la famille des Graphocératidés. Les principaux genres et les espèces types se succédant dans le temps sont, dans l'ordre : *Leioceras* (ex. *Leioceras opalinum* (Reinecke)) pour l'Aalénien inférieur ; *Ludwigia* (ex. *Ludwigia murchisonae* (Sowerby)) et *Brasilia* (ex. *Brasilia bradfordensis* Buckman) pour l'Aalénien moyen ; *Graphoceras* (ex. *Graphoceras concavum* (Sowerby)) pour l'Aalénien supérieur.

La pierre dorée *stricto sensu*, celle que l'on reconnaît dans les murs et les maisons des Monts d'Or et du Beaujolais et qui forme l'essentiel de la série calcaire, ne représente qu'une petite partie du temps de l'Aalénien, comprise entre la fin de l'Aalénien moyen et le début de l'Aalénien supérieur.

2. Caractères et constitution de la pierre dorée

A propos des couches géologiques

Depuis longtemps, la pierre dorée était considérée comme un ensemble assez homogène de calcaires jaune-orangé dits « à entroques », ponctué de rognons et de bancs de silex (les « chailles » ou « charveyrons » pour les carrières locales), et flanqué çà et là de « stratifications » dites « entrecroisées » (non continues ou « obliques »)¹. Cette masse d'apparence uniforme présente en fait de nombreuses variations sur le plan lithologique (nature de la roche), sur le plan de la nature et de la dimension des structures sédimentaires et sur le plan du contenu de la roche en fossiles ou fragments de fossiles. Des minéraux (notamment la silice), des structures sédimentaires (notamment les stratifications obliques) et des espèces fossiles apparaissent à des niveaux plus ou moins précis et constants d'un affleurement à l'autre. On peut ainsi aujourd'hui diviser le Calcaire à Entroques en cinq grandes unités de dépôt homogènes et successives (ou unités stratigraphiques), que l'on reconnaît partout dans les Monts d'Or et le Beaujolais, ainsi que dans le Mâconnais (**fig. 2**) :

- **Unité I** - *quelques dizaines de cm* - Aalénien inférieur - Calcaires et marnes de base.

- **Unité II** - *5 à 15 m* - Début Aalénien moyen - « Calcaire à Zoophycos » : calcaires et calcaires marneux jaunes à traces de *Zoophycos* (pistes d'organismes vermiformes limivores).

1. Le terme « entrecroisée » encore utilisé, qui qualifie un type de stratification, devrait progressivement être abandonné. L'idée première qu'il exprime n'a pas de réalité dans les dépôts sédimentaires, les stratifications pouvant se recouper mais ne se croisant jamais. On lui préfère le terme « oblique » qui désigne simplement une stratification qui n'est pas parallèle à la limite de la couche ou de la formation.

Fig. 2 : Le Calcaire à Entroques aalénien des Monts d'Or et du Beaujolais : coupe de référence des carrières de Belmont (Beaujolais méridional, Rhône). Divisions stratigraphiques, constitution lithologique et caractérisation temporelle des dépôts sédimentaires. La série calcaire de la Pierre Dorée révèle une très nette variation du taux de sédimentation au cours du temps : les unités compactes à stratifications obliques (unités III et V) montrent de grandes épaisseurs de sédiments accumulés pendant des temps de dépôt très courts. A l'opposé, les unités argileuses bioturbées (unités I, II et IV) enregistrent bien moins de sédiments au cours de temps de dépôt considérablement plus longs. Ces différences traduisent des variations importantes de la production et du flux de sédiments durant l'Aalénien.

- **Unité III** - 15 à 20 m - Fin Aalénien moyen - «Unité Compacte Inférieure» : calcaires jaunes à entroques, à niveaux de chailles et à niveaux de stratifications obliques.

- **Unité IV** - quelques cm à 10 m - Passage Aalénien moyen-Aalénien supérieur - «Unité Intermédiaire Bioturbée» : calcaires à entroques et à bryozoaires et calcaires marneux (voire marnes parfois), très souvent colorés en rouge et portant des traces d'activité biologique («bioturbation»).

- **Unité V** - 5 à 15 m - Début Aalénien supérieur - «Unité Compacte Supérieure» : calcaires jaunes à entroques, à bryozoaires, à niveaux de chailles et à niveaux de stratifications obliques.

Il existe des dépôts de la fin de l'Aalénien supérieur, mais ils se limitent à des couches de quelques dizaines de centimètres d'épaisseur au maximum, très fossilifères et que l'on observe très irrégulièrement dans des dépressions de la surface d'érosion qui entaille le sommet du Calcaire à Entroques.

A propos des sédiments et des fossiles

La pierre dorée est une roche sédimentaire marine fondamentalement calcaire et détritique : c'est d'abord et avant tout le résultat de l'accumulation d'innombrables fragments de coquilles ou de squelettes calcaires de divers organismes marins. On parle de roche «biogénétique» (issue du monde vivant). Viennent s'y ajouter, dans des proportions beaucoup plus réduites, des débris résultant de la dégradation de roches continentales et des éléments minéraux annexes.

Les produits détritiques venant des terres émergées sont constitués de petits grains de quartz (base et milieu de la série), mais surtout de l'argile, présente dans ou entre les bancs calcaires. Un oxyde de fer et la silice des chailles (calcédoine) forment les deux principaux éléments minéraux annexes, ces substances provenant, au départ, de l'altération chimique des roches continentales, mais aussi et dans une moindre mesure, de l'hydrothermalisme associé au volcanisme sous-marin (silice). Une part de la silice, recyclée par les micro-organismes planctoniques à coquille siliceuse, puis dissoute, peut avoir été piégée dans les chailles.

Les grains calcaires de la pierre dorée ont des origines spécifiques assez variées. Toutefois, l'écrasante majorité de ces grains (près de 100 % dans certaines strates) est composée de fragments des parties squelettiques calcaires de crinoïdes. Ces échinodermes, dont la ressemblance avec des fleurs est frappante (d'où le nom de «lys de mer»), possèdent des bras articulés et une tige de soutien, également articulée, qui peut être très longue (jusqu'à 10 m). C'est la désarticulation et le morcellement de ces appendices qui fournissent les «entroques» et qui participent prioritairement à l'élaboration du matériel sédimentaire. Les autres grains proviennent de la fragmentation des parties calcaires d'organismes d'autres groupes animaux ou végétaux, avec dans l'ordre d'abondance : les bryozoaires, les bivalves ou lamellibranches, les algues encroûtantes, les brachiopodes, les oursins, les gastéropodes, les éponges et les foraminifères. Dispersées dans le sédiment, des coquilles tout ou partiellement préservées de la destruction (macrofossiles), se sont déposées sur place ou n'ont subi qu'un faible transport (ammonites et lamellibranches surtout).

La constitution et le modelage des couches sédimentaires dépendent de la nature et de l'énergie des phénomènes de transport et de distribution des sédiments sur le fond marin. La considération du degré d'agitation du milieu est essentielle dans notre propos et permet de distinguer deux catégories principales de dépôts sédimentaires :

- (1) Les «dépôts particuliers» ou «gravitaires» ou encore «de décantation», mis en place en milieu calme par simple accumulation de particules légères en suspension, tombées sur le fond de la mer sous forme de «pluie» lente et plus ou moins continue (argiles et «boues» calcaires).

- (2) Les «dépôts granulaires» ou «tractifs», constitués de sédiments plus grossiers et plus lourds, mobilisés et distribués en milieu plus ou moins agité par les vagues et les courants sous-marins. Ces dépôts montrent des «structures sédimentaires» (on dit aussi «faciès de dépôt») aussi nombreuses que variées. Ce polymorphisme faciologique est dû à la variation de la vitesse et de la nature, et donc du mode d'action des courants qui circulent sur le fond. La quasi-totalité des strates de la pierre dorée est composée de ce deuxième type de dépôts sédimentaires.

On aura un aperçu de la variabilité des faciès de dépôt et des processus hydrodynamiques qui les fabriquent en évoquant l'histoire de la sédimentation dans les Monts d'Or et le Beaujolais à l'Aalénien. Les différentes étapes de cette histoire sont schématisées sur la **figure 2**, le temps s'y écoulant de bas en haut.

III. HISTOIRE DU DEPOT DES COUCHES DE LA PIERRE DOREE : HISTOIRE DE MAREES ET DE TEMPETES

Dans les Monts d'Or et dans le Beaujolais, l'initiation du dépôt de la série de la pierre dorée marque la reprise de la sédimentation calcaire franche, abandonnée à la fin du Sinémurien (Calcaire à Gryphées - Jurassique inférieur). En effet, les calcaires à entroques de l'Aalénien succèdent brusquement à un épisode de sédimentation globalement argilo-marneux de longue durée (Pliensbachien et Toarcien, fin du Jurassique inférieur, soit 12 à 13 Ma) (cf photo n°1). Les changements lithologiques observés à la limite ou à proximité de la limite Toarcien-Aalénien ne sont pas le fait du hasard. Ils sont le reflet de changements fondamentaux du milieu marin, eux-mêmes induits par des modifications se produisant sous la mer, sur le continent ou dans l'atmosphère. Quelque chose dans ces environnements «bouge» brutalement (à l'échelle géologique !) et provoque dans la mer le dérèglement et la disparition d'une mécanique de dépôt au profit d'une autre. Sur les terres émergées par exemple, un changement des conditions environnementales, tel un bouleversement climatique, aura pu entraîner un ralentissement généralisé des processus d'altération des roches cristallines, et inhiber, au moins partiellement, le transport vers la mer des matériaux produits par ces processus (argiles notamment).

Dans l'environnement marin, les changements suspectés et éventuels sont avant tout d'ordre physiographique (morphologie du fond et des domaines côtiers) et d'ordre océanographique (nature, direction et force des courants ; polarité et intensité de la houle). Il faut ajouter à ceux-ci des variations d'ordre physico-chimique (température, transparence et composition de l'eau de mer) et des variations ayant trait à la qualité nutritive de l'eau marine (ex. abondance en résidus organiques). Ces évolutions aux causes diverses et aux interactions complexes aboutissent fatalement à des changements d'ordre biologique et, par conséquent, à un bouleversement de l'écosystème sous-marin régional.

Ce que l'on constate de prime abord, c'est le passage très rapide d'une sédimentation argileuse fine, qui implique l'existence d'un milieu calme, à un dépôt calcaire granulaire généré, au contraire, par des mouvements d'eau plus ou moins énergiques.

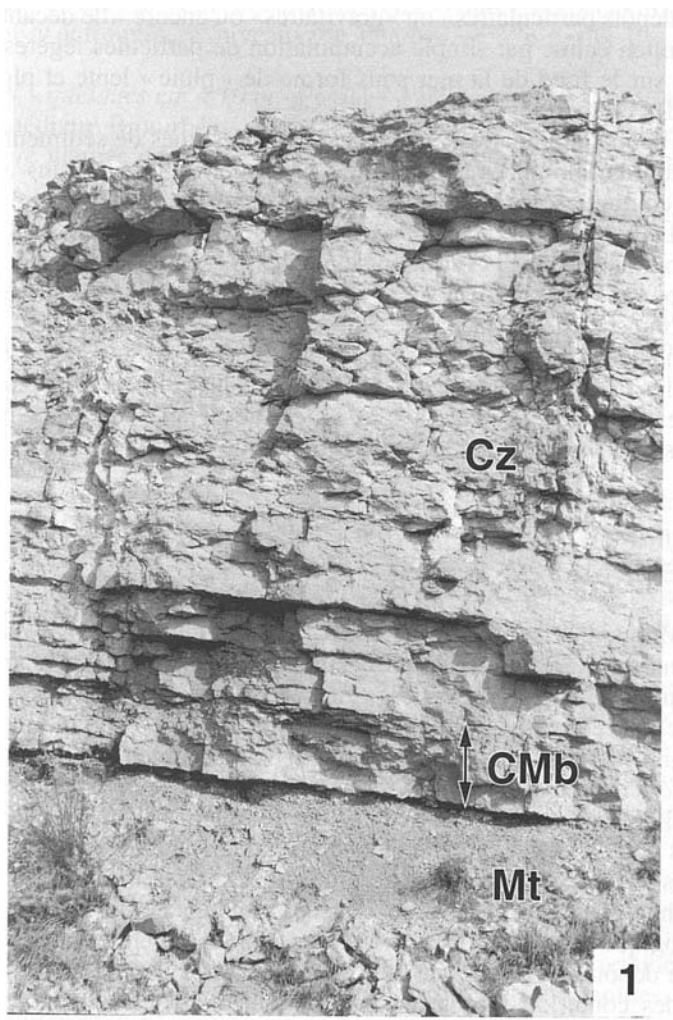


Photo 1.

[Mt] : marnes du Toarcien.

[CMb] : calcaires et marnes de base, Unité 1 (niveau 1) - Aalénien inférieur.

[Cz] : calcaires à *Zoophycos*, Unité 2 (niveau 2) - Aalénien moyen. Succession de bancs calcaires continus et d'interbancs argileux peu épais. Système de dépôts mixtes de décantation et de courant de faible énergie, formé en milieu de plate-forme continentale sous-marine relativement profonde (50 à 100 m). L'Unité Intermédiaire Bioturbée (Unité IV) présente des structures similaires.

Toutes les photographies de cet article ont été prises dans les carrières Lafarge, commune de Belmont (Beaujolais méridional, Rhône). Les niveaux mentionnés correspondent aux niveaux repères de la figure 2.

En somme, on passe de dépôts essentiellement «gravitaires» peu calcaires à des dépôts principalement «tractifs» et très calcaires. Des uns aux autres, les facteurs majeurs du changement se situent dans l'apparition, ou l'augmentation subite, d'un régime de courants sous-marins et dans la production, et/ou l'apport nouveau, d'un type particulier de sédiments : les sédiments calcaires (on parle aussi de sédiments carbonatés, le calcaire étant du carbonate de calcium). Ce sont ces courants, de nature et d'intensité diverses, qui vont assurer le transport et la distribution des sédiments calcaires sur le fond. Leur existence et leur activité sont trahies par l'aspect des dépôts, soit par la nature et par l'arrangement des structures sédimentaires observables à l'affleurement. L'apparition en masse des entroques est, pour une part au moins, la conséquence de l'établissement du nouveau régime de courants. Les débris carbonatés peuvent être ainsi ramenés des milieux où vivent les crinoïdes, ou des milieux où ils viennent de s'installer, et donc des milieux où sont produits les sédiments.

Au début de l'Aalénien, le lieu du dépôt sédimentaire n'est pas proche de la surface de la mer ni situé trop profondément : le fond marin, au commencement de notre histoire, se place dans une tranche d'eau de plusieurs dizaines de mètres à peut-être 100 m de profondeur, quelque part au large sur une plate-forme continentale sous-marine.

Prologue. Aalénien inférieur : initiation timide du dépôt calcaire

Les dépôts de l'Aalénien inférieur sont les plus profonds du Calcaire à Entroques : ils appartiennent au «milieu marin du large» ou «offshore». Les courants sous-marins de fond nouvellement instaurés surviennent de manière très épisodique, leur vitesse est très faible et ils ne circulent pas encore sur toute la plate-forme. Les sédiments mobilisés par ces courants sont encore très fins et sont déposés en strates horizontales et continues. De microscopiques particules calcaires et argileuses peuvent se mélanger à l'ensemble pour former des «boues» sédimentaires (calcaires argileux et marnes de base : **fig. 2 niveau, ph. 1**). Ajoutés à la profondeur, le faible taux de sédimentation, une relative sous-oxygénation et l'abondance de la matière organique favorisent la concentration des phosphates près du fond. Ces conditions permettent aussi aux organismes qui vivent dans le sédiment de perforer et de remanier la matière sédimentaire : c'est le phénomène de bioturbation. On notera à ce propos que les ammonites des calcaires de base sont souvent sens dessus dessous, signe distinctif d'une activité de bioturbation intense et durable.

La sédimentation calcaire et argileuse est donc très faible au cours de l'Aalénien inférieur. Elle enregistre excessivement peu de sédiments pendant un temps très long : 20 à 70 cm d'épaisseur seulement (après compaction) pour une durée approchant peut-être le million d'années (cf. **fig. 2**). Cet endroit de la plate-forme sous-marine n'est apparemment qu'une zone de transit, de faible production carbonatée ou une zone relativement écartée des apports sédimentaires. A titre de comparaison, c'est près de 200 m de sédiments qui s'accumulent dans le même temps dans le bassin provençal, soit près de 400 fois plus que sur la plate-forme. Bien qu'une plate-forme accumule généralement beaucoup moins de sédiments qu'un bassin, le très faible taux de sédimentation observé dans la région des Monts d'Or et du Beaujolais au début l'Aalénien n'en demeure pas moins la conséquence d'un stress extrêmement sévère et durable du processus sédimentaire.

Bull. mens. Soc. linn. Lyon, 2001, 70 (3).

Acte 1. Aalénien moyen : la « machine sédimentaire » s'emballe !

Au cours de la formation de ce qui constituera plus tard les calcaires à *Zoophycos* (**niveau 2, ph. 1**), le dépôt change de rythme. Ce changement est cependant assez lent et intervient sur plusieurs centaines de millénaires. Durant cette période, la profondeur d'eau amorce une diminution graduelle. Le milieu de dépôt devient progressivement plus énergique, plus agité. La vitesse des courants augmente. Les arrivées de sédiments « avant-côtiers » sont de plus en plus nombreuses et volumineuses. Les fines particules cèdent petit à petit la place à des sables calcaires fins puis plus grossiers qui s'organisent en bancs. A l'inverse, les arrêts momentanés de sédimentation, à l'origine des interbancs plus argileux, se font de plus en plus rares et brefs. L'empreinte climatique, responsable présumée des alternances banc calcaire-interbanc marneux s'estompe. Malgré l'oxygénation croissante du milieu, ce changement de régime ne convient guère aux organismes fouisseurs qui avaient l'habitude de vivre dans un sédiment fin et riche en matière organique. Les traces de *Zoophycos* et les terriers « s'effacent » petit à petit, traduisant une disparition progressive des faunes limivores. La bioturbation diminuant, les bancs calcaires deviennent de plus en plus compacts.

Puis la machine sédimentaire s'emballe. La diminution accélérée de la profondeur d'eau « amène » le fond marin dans des zones peu profondes de moyenne énergie. La vitesse, la périodicité et la charge sédimentaire des courants augmentent fortement. L'argile ne se dépose plus ou presque. Chaque banc calcaire n'est plus composite mais correspond à un seul évènement de dépôt et donc à un seul passage de courant. Il commence à se former des structures très compactes, peu épaisses, laminées, relativement continues latéralement et présentant de nettes figures d'érosion à la base (sillons) (**niveau 3**). Parfois, on peut aussi y observer des ondulations façonnées par les vagues. Ces caractères renseignent sur la nature des phénomènes en jeu. Ils permettent de rapporter ces faciès à la dynamique de tempête. Ces structures de courant de tempête de moyenne énergie sont particulièrement propices à la concentration de la silice, d'où les nombreuses chailles présentes à ces niveaux (**fig. 2**).

En fin de chute de la profondeur d'eau, le fond se place à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres tout au plus sous la surface de la mer, dans le « milieu marin de l'avant-côte » ou « shoreface ». Les courants de tempête y sont très énergiques, très érosifs et doublés de fortes houles. Les figures d'érosion rectilignes ou arquées apparaissent extrêmement nombreuses et très marquées. Ces faciès de tempête de haute énergie s'emboîtent les uns dans les autres : on peut parler de faciès « amalgamés » (**niveau 4 : fig. 3, ex. ph. 3**). La vitesse de sédimentation est ici plutôt élevée : malgré les incessantes érosions, il s'accumule beaucoup plus de sédiment en un temps donné que précédemment.

A ce niveau, un changement spectaculaire intervient. Un tout autre régime de courant, générateur de structures sédimentaires très différentes, commence à se mettre en place, en lien avec l'isolement de cette partie de la plate-forme des influences de la houle et des tempêtes. Ce nouveau régime et les structures sédimentaires qui l'accompagnent, les « stratifications obliques » au sens strict, sont associés à la dynamique de marée. Progressivement, des « dunes hydrauliques » (**fig. 4**) font leur apparition çà et là dans les dépôts de tempête (**niveau 5**). Puis les faciès maréaux finissent par s'imposer totalement (**niveaux 6 à 8**). Les taux de sédimentation y augmentent encore, si bien qu'une épaisseur donnée de sédiments représente infiniment moins de temps écoulé que la même épaisseur à la base de la série (cf. courbe de la **fig. 2**). Le changement de processus de dépôt paraît plus ou moins synchrone avec

une inversion très probable de la course du niveau marin relatif : la profondeur de dépôt tend cette fois-ci à s'accroître. Parallèlement, l'évolution de la forme et de la préservation des stratifications obliques semble évoquer une diminution générale de la vitesse des courants de marée (**fig. 3**) : (1) «dunes à front plat» (courants de vitesse plutôt élevée), d'abord très érodées (**niveau 6**) puis mieux préservées (**niveau 7, ph. 2**) ; (2) «dunes à front courbe» (courants de vitesse plutôt faible, **niveau 8**). On estime que la vitesse des courants de tempête ou de marée était de l'ordre du décimètre par seconde (seuil inférieur) à celui du mètre ou du double mètre par seconde (seuil supérieur).

Acte 2. Passage Aalénien moyen - Aalénien supérieur : un double répit !

Deux importants ralentissements de la sédimentation s'établissent de part et d'autre de la limite Aalénien moyen-Aalénien supérieur (**niveaux 9 et 11**). Ces condensations sédimentaires sont dues à l'action conjointe ou exclusive d'une coupure de la plate-forme des apports sédimentaires, d'une augmentation de la profondeur de dépôt et/ou d'une baisse de la production calcaire par les organismes producteurs de carbonate. Il est très probable que la responsabilité de ces crises sédimentaires soit imputable à l'action simultanée d'une augmentation de profondeur et d'une altération de la production carbonatée. Ces conditions de calme très relatif permettent un retour des organismes fouisseurs et en corollaire de la bioturbation. Entre les deux crises s'effectue une brève reprise de sédimentation plus rapide et plus énergique (**niveau 10**).

Acte 3. Aalénien supérieur : et ça repart de plus belle !

Les conditions de sédimentation sont assez identiques à celles décrites pour la fin de l'Aalénien moyen (fin «acte 1»). Le fond marin se «replaces» dans des zones de moyenne à haute énergie, à quelques dizaines de mètres au maximum sous la surface de la mer. Il s'agit de dépôts de tempête plutôt continus (ex. **niveaux 13 et 15**) ou amalgamés (notamment dans les Monts d'Or), et de dépôts de marée constitués de dunes hydrauliques à front variable (ex. **niveaux 12 et 14**) (**ph. 4**). Parfois, dans les Monts d'Or surtout, ces différents dépôts s'entremêlent et forment des corps mixtes, où dynamiques de tempête et de marée se chevauchent dans le temps et dans l'espace.

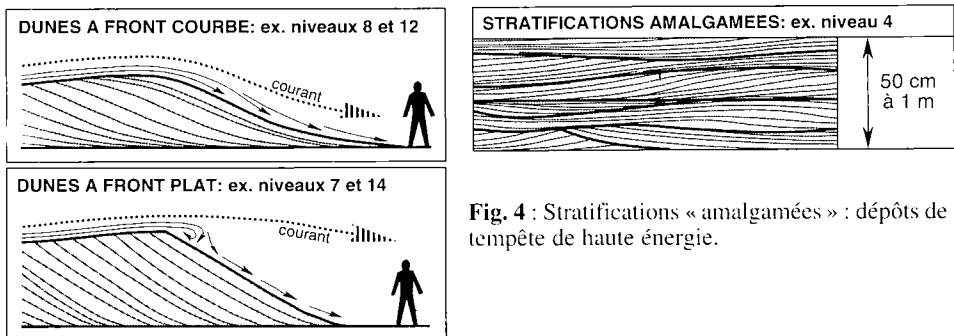


Fig. 4 : Stratifications « amalgamées » : dépôts de tempête de haute énergie.

Fig. 3 : Stratifications « obliques » au sens strict : dépôts associés à la dynamique de marée.

La particularité de l'Unité Compacte Supérieure réside bien souvent dans l'alternance quasi régulière des systèmes de tempête et de marée. La rythmicité de changement environnemental est en partie la marque de mouvements tectoniques répétés du fond marin qui contribuent à modifier la nature et la polarité des flux hydriques et sédimentaires. Ces mouvements et ces évolutions sont à mettre à l'actif d'une restructuration géographique de la plate-forme, particulièrement soutenue à l'Aalénien supérieur. Du reste, dans les séries de l'Aalénien supérieur des Monts d'Or, du Beaujolais et du proche Jura, on observe, par places, des structures à stratifications anormales ou glissées, vraisemblablement produites par l'activité sismique accompagnant cette restructuration.

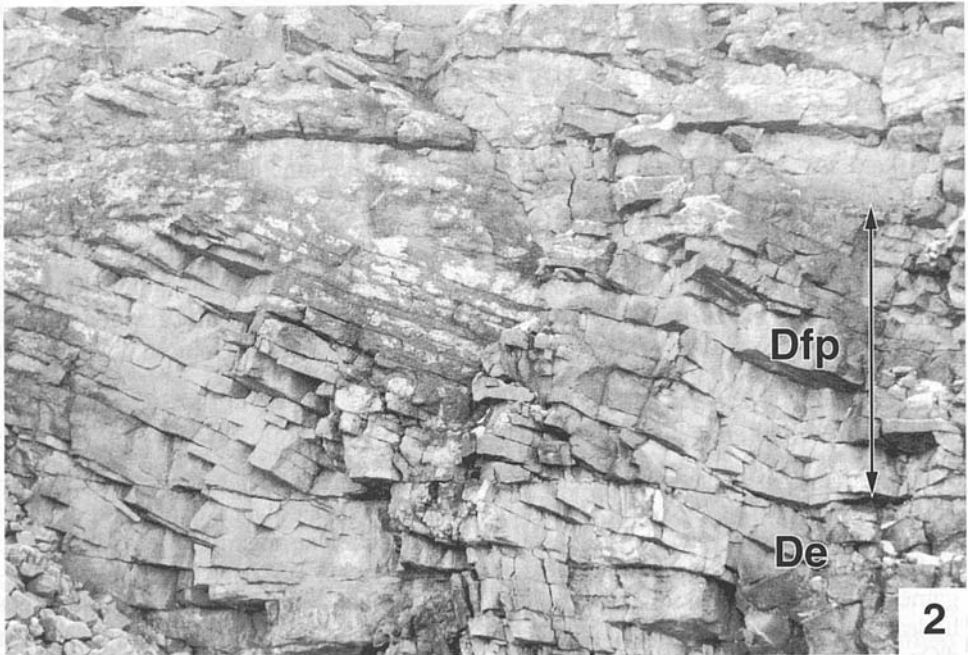


Photo 2. Unité Compacte Inférieure, Unité III - Aalénien moyen. Système à stratifications obliques rattaché à la dynamique de marée.

[De] : empilement de dunes hydrauliques érodées (niveau 6).

[Dfp] : dune hydraulique à front plat relativement bien préservée (niveau 7).

Photo 3. Unité Compacte Supérieure, Unité V - Aalénien supérieur.

[Ta] : corps résiduel à stratifications amalgamées : emboîtement de structures érodées et tronquées portant les stigmates d'une activité de houle forte. Dépôts de tempête de haute énergie formés en milieu de plate-forme continentale sous-marine peu profonde (quelques mètres à quelques dizaines de mètres). Structures comparables à celles du niveau 4 présent systématiquement.

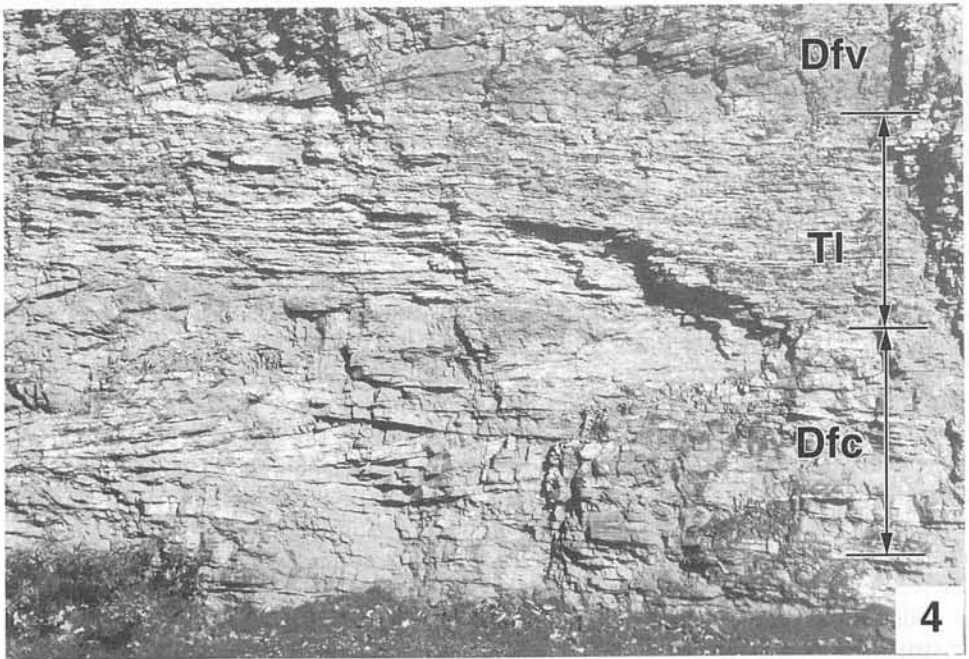
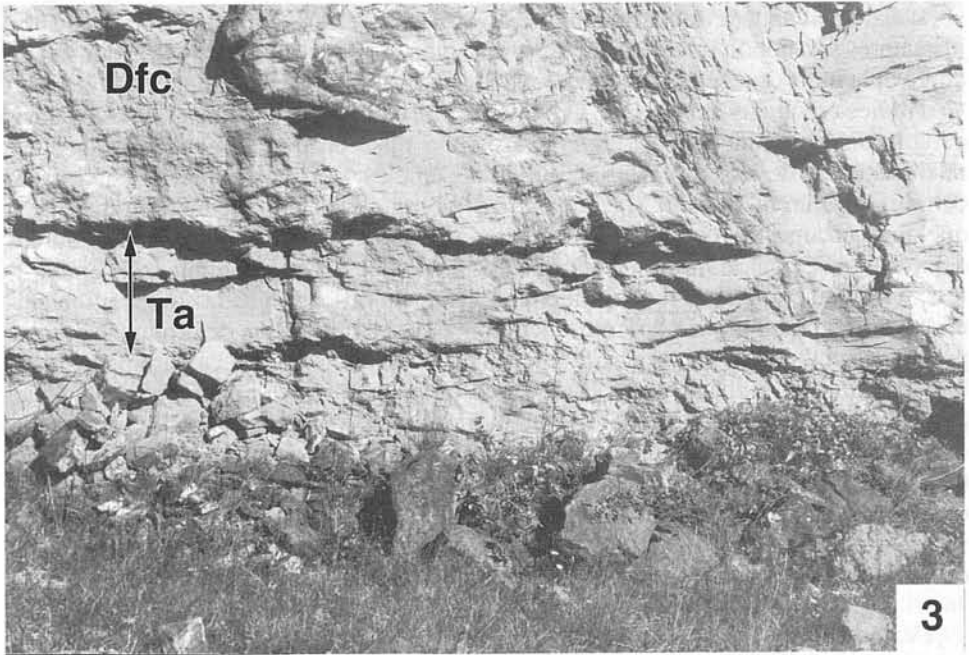
[Dfc] : base de l'empilement de dunes hydrauliques à front courbe (niveau 12). Le corps inférieur montre une nette variation de la forme de la ligne de front.

Photo 4. Unité Compacte Supérieure, Unité V - Aalénien supérieur. Alternance d'obliques de marée et de bancs de tempête.

[Dfc] : empilement de dunes hydrauliques à front courbe (niveau 12).

[TI] : empilement de petites structures litées et ondulées : dépôts de tempête de moyenne énergie (niveau 13).

[Dfv] : empilement de dunes hydrauliques à front variable (niveau 14)



Epilogue. Fin de l'Aalénien : fin catastrophique !

L'Aalénien supérieur est incomplet. Le sommet des calcaires à entroques a subi, juste après son dépôt, une nette érosion, probablement sous-marine, dont l'intensité, la durée et la ou les causes restent encore assez obscures. Il n'a pour l'heure pas été relevé d'indices probants d'émersion. Couplée à cette érosion locale, une altération considérable de la production des carbonates a été mise en évidence latéralement. Le ralentissement de la sédimentation qui en découle est des plus impressionnants. Sur certains affleurements du Mâconnais, on ne relève que quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres de sédiments calcaires seulement pour des durées dépassant aisément le million d'années. Ce phénomène catastrophique, est semble-t-il, d'extension planétaire. Il pourrait être lié à une modification de la composition chimique des eaux du globe par l'introduction massive dans l'océan de produits solubles par un volcanisme aérien intensif, aujourd'hui reconnu et daté. Les paramètres écologiques du milieu marin auraient été ainsi brutalement et durablement changés au point d'affecter très sérieusement les conditions d'existence de nombreuses espèces «calcogènes», dont les crinoïdes. Dans les Monts d'or et dans le Beaujolais, quelques dépôts de la fin de l'Aalénien supérieur se retrouvent parfois par flaques dans des dépressions de la surface d'érosion qui coiffe la pierre dorée. Leur aspect très condensé, très remanié et paléontologiquement sélectif est révélateur d'un changement radical autour et au sein la communauté biologique productrice de carbonates.

IV. PALEO-PAYSAGE ET PALEO-ENVIRONNEMENT DE LA PIERRE DORÉE

1. Un paysage de plate-forme continentale

Les sédiments qui constituent la pierre dorée des Monts d'Or et du Beaujolais se sont donc accumulés sur une plate-forme continentale sous-marine peu profonde (quelques dizaines de mètres en moyenne). Cette plate-forme se situait sur les rivages septentrionaux de l'océan Téthys, dont les eaux abyssales se trouvaient au moins à un bon millier de kilomètres de là vers l'est et le sud-est, bien au-delà de la zone alpine (notons qu'une disposition différente de ce qu'est aujourd'hui la France impliquait que la ligne méridienne nord-sud de l'époque était proche d'une ligne nord-est/sud-ouest actuelle).

A l'Aalénien, la plate-forme carbonatée présente une extension grossièrement nord-sud. Elle borde les hauts-fonds du Massif Central à l'ouest et descend en pente douce vers le domaine périalpin plus profond à l'est. D'abord limitée à la bordure orientale du Massif Central à l'Aalénien moyen, la plate-forme calcaire progresse vers le Jura à l'Aalénien supérieur. La naissance du complexe crinoïdique à l'Est du Massif Central à l'Aalénien moyen résulte vraisemblablement, au moins en partie, d'une réorganisation structurale, par le rejeu d'anciennes failles, de cette région du domaine Nord-téthysien. Ce phénomène s'accompagne naturellement d'un changement des caractéristiques du milieu (profondeur, nature et direction des courants, température et composition de l'eau de mer), qui peut aussi expliquer partiellement l'arrivée en masse des crinoïdes au début de l'Aalénien moyen. L'activité tectonique se poursuit plus activement à l'Aalénien supérieur, comme en témoignent l'existence de structures de glissement, produites par des séismes, et comme le suggère la répartition non uniforme des accumulations de sédiments calcaires sur la plate-forme.

Bien que les eaux marines fussent peu profondes à divers moments de l'Aalénien, il ne semble pas y avoir eu de côte ou même de haut-fond à proximité immédiate de la région qui comprend aujourd'hui les Monts d'Or et le Beaujolais. Il est certain cependant que le fond de la mer remontait vers des secteurs moins profonds ou même émergés en direction du Massif Central. En effet, sans négliger la possibilité de l'existence d'une vaste zone émergée, il devait au moins subsister quelques îles résiduelles à plusieurs dizaines de kilomètres en direction de l'ouest et du sud-ouest. C'est probablement de ces «Terres du Couchant» que provenaient les bois fossiles retrouvés à Belmont à la base du Calcaire à Entroques.

La plate-forme sous-marine était parcourue par des courants de fond. Ces courants, davantage temporaires que permanents, étaient créés par les phénomènes de tempête ou de marée, selon la topographie de la plate-forme, selon son degré d'exposition à la haute mer et selon sa position et son orientation par rapport aux flux atmosphériques. Ils assuraient le transport de la matière sédimentaire, parfois sur de longues distances, et acheminaient celle-ci depuis les lieux où étaient produits les sédiments. Les courants de marée poussaient devant eux de grands champs de rides et de dunes hydrauliques qui pouvaient atteindre aisément 2 à 3 m de hauteur.

2. Les contrastes d'un climat tropical

À l'Aalénien, le secteur des Monts d'Or et du Beaujolais se situait aux environs de 30° de latitude nord, soit en position tropicale. Cette position latitudinale et le climat globalement plus chaud de l'époque devaient rendre les eaux continentales qui ennoyaient la plate-forme relativement chaudes et ensoleillées. La présence de faunes et de flores plutôt «chaudes» (coraux, bryozoaires et algues encroûtantes) renforce cette idée. De temps en temps, les dépressions tropicales qui naissaient au-dessus de l'océan Téthys devaient provoquer de fortes tempêtes, propulsant les eaux de surface vers les zones peu profondes, à la manière de ce que l'on peut observer aujourd'hui sur les côtes du golfe du Mexique. Ces masses d'eau revenaient alors vers le large sous forme de courants de fond qui balayaient la plate-forme. À ces phénomènes s'associaient des houles de forte amplitude capables de marquer le sédiment en profondeur.

3. L'odyssée de la faune

Contrairement aux apparences, la plate-forme beaujolaise n'était pas si riche en crinoïdes. Ceux-ci vivaient davantage dans des milieux quelque peu plus éloignés et plus favorables (moins profonds ? plus oxygénés ? plus nutritifs ?), s'étendant probablement à l'ouest en direction des hauts-fonds du Massif Central. Là, les crinoïdes pouvaient former de vastes prairies sous-marines, sortes de grands systèmes producteurs de matière carbonatée. À l'Aalénien, l'axe Monts d'Or-Beaujolais était surtout une zone d'accumulation des débris et non de reproduction et de vie des crinoïdes. Du reste, les fossiles de crinoïdes entiers ou partiellement préservés sont extrêmement rares dans la pierre dorée. Ces constatations n'empêchent pas cependant que quelques populations téméraires se soient développées par endroits, notamment dans les environnements de marée. Au côté des crinoïdes, vivaient de nombreux groupes d'invertébrés : bivalves, oursins, gastéropodes, brachiopodes, bryozoaires, crustacés, coraux solitaires, éponges, vers marins, protozoaires...

Les céphalopodes (nautilus, ammonites et bélemnites), figures marines emblématiques de l'ère Secondaire, semblaient peupler autant les zones proximales peu pro-

fondes que les zones distales plus profondes de la plate-forme. Leur abondance dans les dépôts distaux de basse énergie (calcaires et marnes de base) et, au contraire, leur rareté dans les dépôts proximaux de moyenne à haute énergie (pierre dorée s.s.) sont d'abord le fait d'une différence de taux de sédimentation. Ce dernier est en règle générale plus élevé dans les zones proximales où, pour un temps donné, un nombre donné de coquilles se trouve dispersé dans des volumes de sédiment plus grands que dans les zones distales.

Les eaux relativement chaudes, claires et oxygénées devaient convenir aux poissons tropicaux et aux «reptiles» marins (ichthyosaures et plésiosaures), dont on retrouve aussi des restes dans les dépôts distaux plus fossilifères de la base des calcaires à entroques. Enfin, planant au-dessus de la mer, des ptérosaures («reptiles» volants), bien qu'éloignés des côtes, passaient peut-être de temps à autre à la poursuite d'un banc de poissons ou à l'occasion d'une migration entre terres émergées.

CONCLUSION

A l'opposé de son aspect uniforme immédiat, la pierre dorée laisse entrevoir un ancien paysage sous-marin complexe et en constante évolution : les mouvements de l'eau sont perceptibles dans les structures sédimentaires qui évoquent des eaux peu profondes, agitées par les marées et les tempêtes ; la vie est en partie dévoilée par les fossiles et leurs traces qui témoignent d'eaux oxygénées, claires et plutôt chaudes ; les événements sont contés par les sédiments et les fossiles qui révèlent l'alternance de périodes stables, où les organismes marins produisaient activement de la matière carbonatée, et de périodes d'instabilité ou de stress, que ces derniers subissaient ou qu'ils fuyaient et qui étaient la conséquence de changements, graduels ou catastrophiques, régionaux ou globaux, de l'environnement marin. Quelques pages de l'histoire de cet étonnant «monde retrouvé» de l'Aalénien demeurent gravées dans les strates du Calcaire à Entroques des Monts d'Or et du Beaujolais. Aussi, la pierre dorée est loin de l'image de monotonie qu'on lui a souvent prêtée ; elle renferme au contraire les traces d'un court moment du passé riche et vivant de notre Terre.

REMERCIEMENTS

Je tiens une nouvelle fois à remercier chaleureusement les personnes qui, d'une façon ou d'une autre, ont contribué à la réalisation des travaux qui sont à l'origine de cet article : Gilles Dromart et Serge Elmi de l'université Lyon I ; la direction de l'usine et des carrières Ciments Lafarge Val d'Azergues ; Louis Rulleau et Marc Dupoizat de la Section Géologie-Paléontologie du CE Ciments Lafarge Val d'Azergues. J'exprime également ma reconnaissance à Fleury Pizzetta, Jean-Pierre Prandini et Axel Jarrossay pour leurs conseils ou leur sollicitude particulière.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ROUSSELLE B., 1997. – Partition stratigraphique des faciès et des volumes de dépôt en domaine de plate-forme carbonatée. Exemple dans l'Aalénien du Sud-Est de la France. - Thèse de Doctorat, *Les Documents (Centre des Sciences de la Terre, université de Lyon)*, n° 143, 225 P.