

LES CAHIERS DE LA



Réserve Naturelle  
SAINTE-VICTOIRE

© Thierry Tortosa

CAHIER N°2

# ÉCLOSION

D'UNE RÉSERVE



# QUELQUES MOTS SUR LE GÉOPATRIMOINE

Sous la direction de :

Thierry TORTOSA - CD13-DEGPR / Réserve Naturelle de Sainte-Victoire

Monique VIANEY-LIAUD - ISEM UMR 5554, UM/CNRS/IRD/EPH.

Maquette :

Ingrid JAMMES - CD13 / Direction de l'Environnement, des Grands Projets et de la Recherche.

Crédit photos :

Nicolas BERTUCCELI, Joël BOURIDEYS, Gilles CHEYLAN, Isabelle COJAN, Sandrine ECOCHARD, Nadine GOMEZ,

Annie et Patrick MECHIN, Frédéric PAUVAREL, Jean PHILIP et Thierry TORTOSA.

Relecture générale :

Anne BOUNIAS-DELACOUR, Isabelle COJAN, Yves DUTOUR et Thierry TORTOSA.

Crédit dessins :

Isabelle COJAN, Géraldine GARCIA, Jean PHILIP, Thierry TORTOSA et Monique VIANEY-LIAUD.

Dépôt légal : mai 2022

ISBN : 978-2-9507010-1-5

Ce cahier est accompagné d'une carte géologique interprétative (voir chapitre 2).



**LA PAROLE DE LA PRÉSIDENTE  
DU CONSEIL DÉPARTEMENTAL**

*Gérée par le Département qui en est aussi le propriétaire, la Réserve naturelle de Sainte-Victoire, qui jouit d'un des plus hauts niveaux de protection en France, a été inscrite cette année sur la liste verte des aires protégées de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN).*

*C'est la première réserve naturelle à vocation géologique du monde à figurer sur cette liste.*

*La liste verte met en lumière les sites mondiaux qui agissent pour la conservation de la nature et obtiennent des résultats tangibles. C'est un label international qui vise à reconnaître les aires protégées gérées équitablement et efficacement avec des impacts positifs sur la nature et les sociétés. Sur les 140 hectares du site de Sainte-Victoire, dont l'accès est totalement interdit, 1 500 espèces vivantes ont été recensées en quelques années, montrant la valeur biologique d'une réserve qui abrite également des trésors géologiques (fossiles, ossements, œufs de dinosaures...).*

*L'inscription sur la liste verte vient couronner les efforts consentis par le Département pour la gestion de sa Réserve naturelle, la protection de son patrimoine biologique et la valorisation de son géo-patrimoine.*

*Ce « Cahier de la Réserve naturelle de Sainte-Victoire » va permettre au grand public de mieux connaître ce joyau de notre territoire depuis sa création jusqu'à aujourd'hui et je m'en réjouis.*

*Bonne lecture à tous !*

**Martine VASSAL**, Présidente du Conseil départemental des Bouches-du-Rhône  
Présidente de la Métropole Aix-Marseille-Provence



**LA PAROLE DU SOUS-PRÉFET  
D'AIX-EN-PROVENCE**

*La montagne Sainte Victoire a nourri l'imaginaire des artistes. On découvre sa silhouette caractéristique dans l'œuvre centrale de Cézanne, mais aussi de Loubon, Granet, Guigou, Masson et autres peintres provençaux. Elle est également évoquée au fil des pages de Giono, Mistral, Daudet et Pagnol, auteurs qui ont magnifié la Provence à travers elle. Dominant la campagne aixoise, cette montagne est justement préservée. Classée au titre des sites en 1983, elle est labellisée Grand Site de France depuis 2004. Au pied de ce vaste paysage, le vallon des Grands Creux a attiré l'attention des paléontologues qui ont découvert des fossiles, identifiés comme œufs et squelettes de dinosaures. Déjà auréolée d'une renommée paysagère et artistique mondiale, ces découvertes lui ont donné un renom scientifique international, qui a motivé son classement en réserve naturelle nationale en 1994. Ce « Cahier de la Réserve Naturelle de la Sainte-Victoire » présente l'état des découvertes géologiques et paléontologiques les plus récentes. Je souhaite qu'il offre aux visiteurs des clés pour mieux comprendre cet espace protégé et en apprécier l'intérêt patrimonial. Je remercie les élus et les équipes du Conseil départemental pour leur action dans la conservation et la gestion de cette réserve naturelle nationale, ainsi que pour la diffusion des connaissances auprès du public, tout particulièrement les scolaires et les étudiants. Pour eux, comme pour nous, la montagne Sainte-Victoire doit continuer de demeurer un trésor à préserver et une source constante d'inspiration. À ce titre, elle participe à la vie de la Provence et constitue un projet pour le territoire.*

**Bruno CASSETTE**, Sous-préfet d'Aix-en-Provence

# TABLE DES MATIÈRES

<i>Chapitre 1 :</i> <i>SAINTE-VICTOIRE : GENÈSE D'UNE RÉSERVE NATURELLE NATIONALE</i> <i>Bourideys J. &amp; Bourrelly M.</i>	7
<i>Chapitre 2 :</i> <i>GÉOLOGIE DE LA RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE</i> <i>Philip J.</i>	25
<i>Chapitre 3 :</i> <i>LES SOLS ET PAYSAGES DE PROVENCE AU CRÉTACÉ TERMINAL</i> <i>Cojan I</i>	49
<i>Chapitre 4 :</i> <i>L'APPORT DES RECHERCHES DU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE</i> <i>D'AIX-EN-PROVENCE À LA CONNAISSANCE DE LA REPRODUCTION</i> <i>DES DINOSAURIENS DE PROVENCE</i> <i>Cheylan G.</i>	65
<i>Chapitre 5 :</i> <i>RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE : UN SITE-LABORATOIRE</i> <i>POUR L'ÉTUDE DES ŒUFS DE DINOSAURIENS</i> <i>Garcia G. &amp; Vianey-Liaud M.</i>	85
<i>Chapitre 6 :</i> <i>RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE : SOUS LES ŒUFS,</i> <i>DES OS DE DINOSAURIENS</i> <i>Tortosa T. &amp; Buffetaut E.</i>	111
<i>GLOSSAIRE</i>	146



© Joël Bourideys

## JOËL BOURIDEYS

*Chargé de mission réserves naturelles  
Correspondant géosciences,  
Direction Régionale de l'Environnement,  
de l'Aménagement et du Logement PACA,  
36 boulevard des dames 13002 Marseille.*

## MICHEL BOURRELLY

*Directeur de la Réserve Naturelle  
de Sainte-Victoire, Département  
des Bouches-du-Rhône, Hôtel  
du Département, 52 avenue Saint-Just  
13256 Marseille.*

### Mots-clés :

Protection et réglementation,  
Géopatrimoine,  
Oeufs de dinosaures,  
Gestion et missions,  
Département des Bouches-du-Rhône,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

*Article reçu le 6 novembre 2017  
Article accepté le 25 mai 2020*

# SAINTE-VICTOIRE : GENÈSE D'UNE RÉSERVE NATURELLE NATIONALE

JOËL BOURIDEYS & MICHEL BOURRELLY

### Résumé :

Si le gisement paléontologique de Roques-Hautes est connu depuis le 19<sup>e</sup> siècle, c'est bien plus tard que des études furent menées sur ces parcelles qui démontrèrent notamment la richesse exceptionnelle du site. Ces découvertes attirèrent l'attention de paléontologues et collectionneurs qui participèrent à la dégradation du gisement. Après l'incendie de 1989, l'érosion des sols, provoquée par les orages de fin d'été, a fragilisé encore plus le site. Le Conseil général des Bouches-du-Rhône, propriétaire de ces terrains et conscient de la nécessité de protéger ce patrimoine paléontologique, demanda et obtint son classement en réserve naturelle en 1994. Un premier plan de gestion fut élaboré en 2008 en axant ses objectifs sur la protection de la réserve. Le deuxième plan de gestion (2015-2020), outre la conservation du site, définit des objectifs de connaissance de la faune et de la flore. Ainsi, les attentes des nombreuses personnes qui se sont mobilisées dans les années 1980 et 1990 sont maintenant récompensées.

### Abstract :

Even though the paleontological locality of Roques-Hautes is known since the 19th century, studies that have demonstrated the exceptional richness of the site were conducted on this area much later. These discoveries have attracted paleontologists and collectors attention, whom participated to the degradation of the site. After the 1989's wildfire, the site was further degraded by soil erosion caused by summer storms. The Conseil général des Bouches-du-Rhône, owner of these lands and aware of the need to protect this paleontological heritage, asked and obtained its classification as a natural reserve in 1994. A first management plan was developed in 2008, focusing on the protection of the natural reserve. The second management plan (2015-2020), in addition to the conservation of the site, sets out objectives for knowledge of fauna and flora. Therefore, people's expectations mobilized during the 1980s and 1990s are now rewarded.

## 1. L'ORIGINE DE LA RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE

Le site de Roques-Hautes est connu pour son intérêt géologique et paléontologique depuis le 19<sup>e</sup> siècle (Collot, 1880). C'est toutefois un siècle plus tard, dans les années 1940, que l'abbé de Lapparent décrit plus précisément le site et les pontes d'œufs fossilisés, qu'il attribue à des dinosauriens du Crétacé (Lapparent, 1947). Très rapidement d'autres scientifiques s'intéressent à ces fossiles, comme Raymond Dughi et François Sirugue, respectivement conservateur et conservateur-adjoint du Muséum d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence (chapitre 4). Leurs études portent sur les pontes et les coquilles de l'ensemble de la haute vallée de l'Arc, dont Roques-Hautes.

Ces découvertes attirent l'attention de géologues et paléontologues amateurs, puis de collectionneurs et du grand public. De nombreux actes de pillage sont constatés, à tel point que la communauté scientifique s'en émeut. Le site de Roques-Hautes est estimé exceptionnel et de renommée internationale, vu le nombre d'œufs fossilisés dont le gisement est estimé à un million (Gomez, 1986). On craint toutefois que le gisement ne vienne à disparaître vu l'importance des prélèvements.

Pour tenter d'enrayer ce phénomène, une première intervention de l'État se concrétise en 1964. Par décret du ministère chargé des affaires culturelles, le gisement paléontologique de Roques-Hautes est classé d'office parmi les sites scientifiques et pittoresques, considérant le refus des propriétaires concernés (décret du 21/02/1964 – J. O. du 26/02). Cette mesure réglementaire n'a aucun effet notable sur les prélèvements qui se poursuivent. Les collectivités ont-elles des moyens plus efficaces pour enrayer ces pratiques ? Le Conseil général des Bouches-du-Rhône se porte acquéreur du domaine de Roques-Hautes et du parc de Sainte-Victoire en 1973, puis du vallon de Doudon en 1974. Il en confie la gestion à l'Office National des Forêts (ONF). La situation reste inchangée et les prélèvements sauvages d'œufs se poursuivent. Des particuliers écrivent à l'ONF et à la Délégation Régionale à l'Architecture et à l'Environnement (DRAE). Ils dénoncent les pillages répétés constatés à Roques-Hautes, déplorent la non intervention, ou l'impossibilité d'intervention des pouvoirs publics, et demandent une protection effective du gisement.

## 2. COMMENT PROTÉGER LE SITE ?

La réponse est loin d'être évidente. Dans les années 1980 il n'existe aucun outil réglementaire approprié pour prévenir, dissuader et à plus forte raison sanctionner le pillage d'un site paléontologique.

Le gisement de Roques-Hautes a été classé en 1964 en application de la loi du 2 mai 1930 sur les sites. L'article 8 de cette loi, visé par le décret de classement, reconnaît le caractère scientifique du gisement d'œufs de dinosauriens. Il faut attendre la publication de la loi relative à la protection de la nature, le 10 juillet 1976, pour disposer d'un texte fondateur permettant d'offrir un certain degré de protection aux sites à caractère géologique. Les principales dispositions de cette loi concernent d'une part la protection des espèces animales et végétales, d'autre part la protection des espaces naturels. Ainsi sont institués les réserves naturelles (actuellement réserves naturelles nationales), les réserves naturelles volontaires (réserves naturelles régionales) et les arrêtés préfectoraux de protection des biotopes. Le décret de classement en réserve naturelle prévoit des dispositions réglementaires applicables aux terrains classés (interdictions ou obligations) et des mesures de gestion. Un comité consultatif présidé par le préfet donne son avis sur les actes de gestion de la réserve naturelle. L'État peut confier la gestion de la réserve naturelle, par voie de convention, à une collectivité locale, un établissement public, au propriétaire ou à une association régie par la loi du 1<sup>er</sup> juillet 1901.

La loi relative à la protection de la nature sera complétée, remaniée, amendée par plusieurs décrets et circulaires d'application. Ceci permettra, par étapes successives, de passer d'une gestion protectionniste ou non interventionniste à une véritable gestion conservatoire des habitats naturels et des espèces animales et végétales en application d'objectifs de gestion prédéfinis. Lors de la rédaction du code de l'environnement en 2002, les principes fondateurs des réserves naturelles nationales ayant pour origine la loi de 1976 sont repris dans l'article L.332-1 du code de l'environnement (encart 1).

### Encart 1 : La protection du patrimoine géologique dans le code de l'environnement

L'article L.332-1 du code de l'environnement introduit des dispositions qui intègrent la protection du patrimoine géologique. Il précise :

*I. - Des parties du territoire d'une ou plusieurs communes peuvent être classées en réserve naturelle lorsque la conservation de la faune, de la flore, du sol, des eaux, des gisements de minéraux et de fossiles et, en général, du milieu naturel présente une importance particulière ou qu'il convient de les soustraire à toute intervention artificielle susceptible de les dégrader....*

*II. - Sont prises en considération à ce titre :*

*(...)*

*4° La préservation de biotopes et de formations géologiques, géomorphologiques ou spéléologiques remarquables.*

## 3. LE LONG CHEMINEMENT VERS LA CRÉATION DE LA RÉSERVE NATURELLE

Entre 1964 et 1974, faute d'outil juridique adapté et faute de gestionnaire apte à dégager les moyens nécessaires à la préservation des fossiles, les pillages incontrôlés du gisement d'œufs de dinosauriens ne pouvaient que se poursuivre. Si les agents de l'ONF, compétents en matière d'infractions au code forestier, avaient engagé une procédure à l'encontre d'un pillard pris sur le fait, il eut été très improbable que le procureur de la république décide de poursuivre ce qui était alors considéré comme un simple vol de cailloux.

Les prélèvements non autorisés d'œufs de dinosauriens continuent. Cependant s'élèvent des réactions favorables à la protection du gisement de Roques-Hautes. Plusieurs rapports, comptes-rendus et études destinées à démontrer l'intérêt scientifique de ce gisement sont portés à l'attention des pouvoirs publics (Chevalier, 1987). En 1985, l'Association de Défense de Châteauneuf-le-Rouge dénonce le pillage de plusieurs pontes dans la vallée de l'Arc, dont à Roques-Hautes. En 1989, une visite de Roques-Hautes est organisée par des géologues de la Réserve Naturelle Géologique de Haute-Provence (RNGHP) pour sensibiliser les élus et les services de l'État à la conservation du patrimoine géologique. Les participants concluent à la nécessité de classer le gisement d'œufs de dinosauriens en réserve naturelle pour en assurer la protection (Gomez, 1989a).

Les conséquences du grand incendie des 28 au 30 août 1989 ont certainement contribué à une prise de conscience collective en faveur de la préservation du gisement. Parti accidentellement de Saint-Marc-Jaumegarde par fort mistral, le feu se propage très rapidement de part et d'autre de la montagne. Il détruit près de 5 000 ha, soit 60 % du massif (Marcoul, 1999). Il brûle la plus grande partie de Roques-Hautes, et en premier lieu le vallon des Grands-Creux (encart 2 et photo 1).

Encart 2 : Août 1989 : Sainte-Victoire brûlé

« À un moment donné on s'est trouvés bloqués avec un groupe sur la crête de Roques-Hautes. On ne pouvait plus avancer. Le feu avait ouvert plusieurs fronts, il nous passait par-dessus à une vitesse folle. L'impuissance complète » (La Provence 10/08/1999).



Photo 1 : Coupe de journal relatant l'incendie ayant ravagé le massif de Sainte-Victoire et datant du 30 août 1989 (La Provence, 10 août 1989).

Dans les semaines qui suivent, les orages de fin d'été provoquent une forte érosion des sols, qui met au jour de nombreux vestiges parmi lesquels des pontes, et des niveaux à ossements (photos 2 et 3). Fin septembre, le Dr. E. Buffetaut, directeur de recherches au CNRS, qui avait sollicité une autorisation de fouilles en juin 1989, prélève des ossements d'un dinosaure appartenant à la famille des **droméosauridés\*** (Gomez, 1989b ; voir encart 3 et chapitre 6).

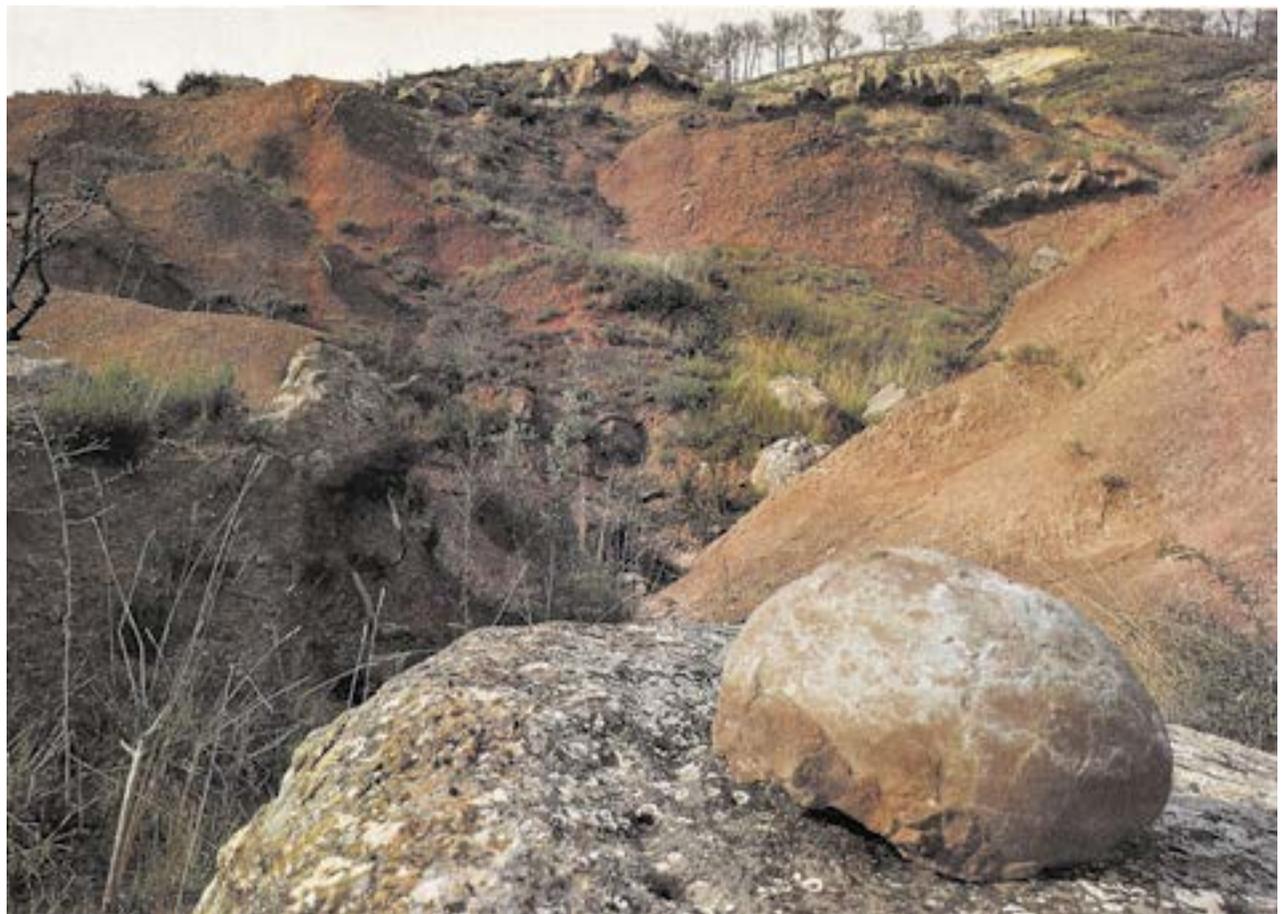


Photo 2 : Deux ans après l'incendie, le paysage est encore dénudé. Sans la forêt qui les protégeait, les œufs fossilisés de dinosaures sont facilement accessibles (Il s'agit ici d'une mise en scène) (Science et Avenir, N°41 – octobre 1991).



Photo 3 : M. Bourelly dégageant un œuf fossilisé de dinosaurien (Les Cahiers de l'Office Départemental de la Culture des Bouches-du-Rhône n°16, avril-mai-juin 1991).

### Encart 3 : Un dinosaurien sur la Réserve !

La découverte de restes d'un petit dinosaurien théropode par le couple de paléontologues amateurs A. et P. Méchin en mars 1983 (photo 4, chapitre 6) motiva le paléontologue E. Buffetaut (directeur de recherche au CNRS) à demander une autorisation de fouille auprès du Conseil général des Bouches-du-Rhône. La collectivité saisie de cette demande informa la DRAE puisque la parcelle fossilifère était inscrite au titre de la loi 1930 en tant que site classé pour le « *caractère scientifique et pittoresque du gisement paléontologique* » (pour ses oeufs de dinosauriens). Les fouilles ne pouvaient donc être autorisées qu'après avis du préfet du département. Une visite des lieux s'organisa le vendredi 3 mars 1989, en présence du Conseil général des Bouches-du-Rhône, de l'Office National des Forêts (alors gestionnaire), de G. Martini et N. Gomez (Réserve Géologique de Haute-Provence), de la DRAE et de l'Agence Régionale pour l'Environnement (ARPE) et du CNRS, afin d'étudier *in situ* la question de l'exploitation du gisement (Gomez, 1989b). Après avis favorable, un dossier fut instruit par la DRAE auprès de la préfecture des Bouches-du-Rhône. Celle-ci valida à son tour le projet en juillet 1989, sous réserve que les travaux soient conduits en association avec la Réserve Naturelle Géologique de Haute-Provence (avec un géologue sur le terrain) et que les fossiles soient ensuite étudiés à Paris puis restitués au CG13 afin qu'il en assure le maintien dans le patrimoine départemental.



Photo 4 : Fouilles paléontologiques dirigées par l'équipe du paléontologue Eric Buffetaut (CNRS) et Nadine Gomez (Réserve Naturelle Géologique de Haute-Provence) avec, de gauche à droite : M. Bourelly, N. Gomez, D. Vasse, pers. indet., J. Le Loeuff et E. Buffetaut (photo Méchin, 1989).



Photo 5 : Décret portant création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.



Photo 5 (suite) : Décret portant création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

Le 15 juin 1990, le Conseil général délibère pour demander le classement en réserve naturelle des gisements à œufs de dinosauriens du Domaine départemental de Roques-Hautes. Un avant-projet est présenté au Conseil National de la Protection de la Nature (CNP) en 1991 (photo 6). Il reçoit un avis favorable. À partir de ce moment l'instruction administrative du dossier de création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire est rapide (Gomez, 1992). Le projet est rapporté par le Pr. Bournérias en mai 1993 devant le CNPN. Il reçoit un avis favorable à l'unanimité. Le 1<sup>er</sup> mars 1994 est signé le décret portant création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire (RNSV) (photo 5).

## 4. LES BASES D'UNE GESTION SCIENTIFIQUE ET NATURALISTE

La publication d'un décret de création d'une réserve naturelle nationale est l'aboutissement d'une procédure souvent longue et délicate (photo 5). Mais c'est surtout le commencement d'une réelle gestion des territoires ainsi protégés. Cette gestion ne devient toutefois effective que lorsque plusieurs conditions sont réunies. Il appartient à l'État de nommer et d'installer en premier lieu le comité consultatif et le conseil scientifique, puis de désigner un gestionnaire et de l'accompagner dans le choix du conservateur. Le gestionnaire et le conservateur rédigent le premier plan de gestion qui est présenté au CNPN puis approuvé par le ministre chargé de l'environnement (collectif, 2008a-b). Ce document dresse l'état du patrimoine naturel de la réserve, fixe les objectifs de conservation et les actions, suivis et travaux nécessaires à l'atteinte des objectifs de conservation. C'est le programme de travail du conservateur pour cinq ans. Pendant la durée de mise en œuvre du plan de gestion, le conservateur procède à l'évaluation annuelle du degré d'atteinte des objectifs, puis à l'évaluation générale avant de rédiger et proposer un nouveau plan de gestion.



Photo 6 : Coupure du journal relatant le projet de création d'une réserve naturelle à Roques-Hautes (Le Provençal, 18 août 1993).



Photo 7 : Prospection scientifique dans les Grands-Creux avec les paléontologues P. Taquet, V. Eiseman et J. Horner (consultant scientifique pour le film Jurassic Park) en mai ou juin 1994 (Photo MHNA).

De manière générale la DIREN (actuellement DREAL) accompagne le gestionnaire d'une nouvelle réserve naturelle dans tous les actes tant administratifs que scientifiques et techniques nécessaires à la gestion de la réserve naturelle, jusqu'à ce qu'il soit autonome (photo 7).

La publication du décret créant la réserve naturelle n'a pas vu de changements immédiats, ni en ce qui concerne la fréquentation, en particulier du site des Grands-Creux, ni les prospections auxquelles se livraient les « amateurs », qu'ils soient collectionneurs voire revendeurs des œufs de dinosauriens prélevés sur place. La sortie en octobre 1993 du premier opus de *Jurassic Park* suscite l'intérêt du grand public pour les dinosauriens, et contribue dans une certaine mesure à amplifier les prélèvements sauvages sur la réserve naturelle.

Le Conseil général des Bouches-du-Rhône, propriétaire des terrains et demandeur du classement, a vocation à gérer cette nouvelle réserve naturelle (photo 8). Mais plusieurs candidats à la gestion se déclarent : la Réserve Naturelle Géologique de Haute-Provence (RNGHP), le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (Martini, 1994). Chaque structure motive sa candidature grâce à des compétences particulières :

- la RNGHP a élaboré le dossier préalable à la création de la réserve naturelle et a assuré le suivi scientifique du site pendant plusieurs années ;
- Le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (MHNA) est une structure géographiquement proche de la réserve naturelle. Il possède des collections paléontologiques locales importantes. Il est donc habilité à la gestion des collections. Structure d'accueil et de sensibilisation du public, il peut assurer l'animation de la réserve naturelle.

D'autres partenaires, tels l'Université de Provence (actuellement Aix-Marseille Université) et la Réserve Naturelle Géologique du Luberon (RNGL) pourraient être associés à la gestion de la réserve naturelle dans une structure à imaginer (Martini, 1994).

Photo 8 : Coupure du journal relatant la gestion de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire confiée au Conseil général des Bouches-du-Rhône (Le Provençal, 1997).

## Le Département veut son "Jurassic Park"

**Le Conseil général demande à l'Etat de lui confier la gestion de la réserve de Roques-Hautes où sont enfouis des œufs de dinosaures**

**T**ouristes d'un genre particulier, les paléontologues du monde entier fréquentent la Provence en toute saison à la recherche de l'un des plus extraordinaires témoignages de notre passé : les œufs de dinosaures.

Depuis la découverte d'un premier œuf, en 1930, par un agriculteur de Roussel, plusieurs dizaines de gisements ont été mis à jour (Etang de Berre, Haut-Var, Eygalières, Alpilles, Meyreuil, Puyoubier), faisant de notre région l'un des plus riches et des plus passionnants sites fossilifères de la planète.

Comme l'explique Philippe Taquet, professeur au Muséum national et directeur du laboratoire de paléontologie, "le bassin d'Aix-en-Provence contient les archives de la terre". D'autant que ce bassin présente la particularité d'abriter les ossements d'espèces ayant vécu au crétacé supérieur, c'est-à-dire à une période proche de l'événement (1) qui a entraîné la disparition totale des dinosaures du globe.

"C'est dans cette région de la Sainte Victoire que la solution de l'énigme peut se trouver, ajoute le P Taquet, car elle est l'une des rares à présenter toutes les couches géologiques de cette période sensible".

### Pillages et déforestation

D'où la nécessité impérieuse de préserver les sites de fouilles afin de permettre aux experts de mener leurs recherches dans les meilleures conditions.

Malheureusement, aux pil-

lages et à la chasse aux fossiles qui font l'objet d'un commerce très lucratif, se pose désormais le problème de l'avancée de l'homme à l'intérieur de la forêt méditerranéenne (constructions de routes et de lotissements); progression de l'urbanisme et pillages facilités par le terrible incendie du 28 août 1989, lequel a ravagé le couvert végétal qui protégeait les sites.

Il y a deux ans, le Conseil général des Bouches-du-Rhône a pu obtenir du ministère de l'Environnement qu'un espace de 140 hectares situé dans la forêt départementale de Roques-Hautes soit classé réserve naturelle, mais cette protection demeure encore insuffisante. C'est pourquoi, le département a demandé au préfet que la gestion de la réserve lui soit confiée afin qu'il puisse coordonner des actions spécifiques de recherches et de protection en partenariat avec les scientifiques concernés - le P Taquet a été sollicité pour présider et animer un comité scientifique - , mais aussi le Muséum d'Aix-en-Provence dont Gilles Cheylan est le conservateur, ainsi que l'Agence départementale pour les espaces sensibles (Ades).

Un dossier sur lequel les pouvoirs publics sont invités à se prononcer sans tarder.

Philippe GALLINI

(1) Selon des études récentes, la collision de l'astéroïde Chicxulub avec la terre, il y a 65 millions d'années, serait la cause de la disparition des dinosaures. L'énergie dégagée aurait été égale à celle de 5 milliards de bombes "Hiroshima".

Le dossier postérieur à la création de la réserve naturelle (archives DREAL PACA) comprend des courriers de déclaration d'intention ou de relance émanant de divers organismes et collectivités, sans qu'aucune décision ne soit prise.

Pendant cette période le Conseil général assume son rôle de gestionnaire de la réserve naturelle. Comme pour l'ensemble des propriétés du domaine départemental dont il a la charge, il fait intervenir la garderie départementale, à cheval et en véhicules. Il aménage des parkings (parking de l'Aurigon) et une structure d'accueil du public. Enfin, il organise des animations à destination des scolaires et du grand public.

Cette situation perdure jusqu'en 2003. À cette date, le ministère chargé de l'environnement harmonise et contractualise le financement des réserves naturelles au niveau national. Il instaure pour chaque réserve une dotation courante optimale (DCO). En contrepartie chaque réserve doit être dotée d'un organisme gestionnaire, d'un conservateur et d'un conseil scientifique. Le Comité Consultatif, qui avait été créé par arrêté préfectoral en décembre 1996, est reconduit et installé sous la présidence du sous-préfet d'Aix-en-Provence le 4 avril 2005. Il examine, et donne un avis favorable à la candidature du Conseil Général pour la gestion de la réserve. Les missions et obligations du nouveau gestionnaire sont précisées par une convention à durée indéterminée signée entre le président du Conseil général et le préfet.

Conformément aux dispositions de cette convention, le Conseil général désigne le directeur de l'Environnement comme directeur de la réserve naturelle. Le premier plan de gestion pour la période 2008 - 2013 est rédigé, puis approuvé le 27 octobre 2008. À partir de ce moment plus rien ne s'oppose à une gestion de la réserve naturelle en conformité avec les dispositions du code de l'environnement, les objectifs du plan de gestion et la politique de conservation de la réserve.

### Encart 4 : Les missions du gestionnaire d'une réserve naturelle nationale

Elles sont définies par les articles R. 332-20 et R. 332-21 du code de l'environnement.

Le ministère chargé de la protection de la nature finance prioritairement :

- la surveillance du territoire et la police de l'environnement,
- la connaissance et le suivi continu du patrimoine naturel,
- les interventions sur le patrimoine naturel, principalement les travaux destinés à entretenir ou restaurer le patrimoine naturel,
- les prestations de conseil études et ingénierie,
- la création d'infrastructures d'accueil,
- le management et le fonctionnement général de la réserve naturelle.

Le gestionnaire peut également s'investir dans des domaines d'activités secondaires :

- la participation à la recherche,
- les prestations d'accueil et d'animation,
- la création de supports de communication et de pédagogie.

Enfin, il peut participer à des expertises, des actions de gestion et des interventions diverses en dehors de la réserve naturelle, comme la mission d'évaluation du plan, de gestion d'une autre réserve naturelle. Ces missions ne figurent pas dans la convention liant le gestionnaire et l'État. Elles font, si nécessaire, l'objet de conventions particulières et de moyens budgétaires dédiés, mais qui ne doivent pas impacter les crédits affectés aux missions prioritaires.

**Encart 5 : Chronologie de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire**

- 1880 : première mention de fossiles sur Roques-Hautes par Collot.
- 1947 : description des coquilles d'œufs fossilisés du site de Roques-Hautes par l'abbé de Lapparent, qu'il attribue à des pontes de dinosauriens datant du Crétacé.
- 1957-1976 : travaux de Dughi et Sirugue sur les œufs de dinosauriens trouvés dans le bassin de l'Arc et sur Roques-Hautes.
- 21/02/1964 : décret portant classement d'office (vu le refus d'adhésion des propriétaires intéressés) du gisement paléontologique de Roques-Hautes (Bouches du Rhône) – Ministère d'État chargé des affaires culturelles.
- 16/10/1973 : achat du domaine de Roques-Hautes et du parc de Sainte-Victoire par le Conseil général des Bouches-du-Rhône (CG13).
- 26/06/1974 : achat du Vallon de Doudon par le CG13.
- 1980 : plusieurs lettres à la DRAE et à l'ONF rapportent des pillages répétés du site de Roques-Hautes.
- 15/09/1983 : décret portant classement au titre des sites de la montagne Sainte-Victoire.
- 1986 : description, parmi l'inventaire des ZNIEFF dites géologiques, du gisement d'œufs de dinosauriens de la Sainte-Victoire. La fiche mentionne les pillages s'exerçant sur le gisement et la nécessité d'une protection.
- 28/08/1989 : incendie de la montagne Sainte-Victoire (Encart 2).
- 26/09/1989 : autorisation préfectorale de réaliser les fouilles en faveur du CNRS en association avec la RNGHP. Description d'ossements d'un dinosaure datant du Crétacé (chapitre 6).
- 15/06/1990 : délibération du CG13 demandant la mise en réserve géologique des gisements à œufs de dinosauriens dans le Domaine départemental de Roques-Hautes.
- 17/05/1993 : avis favorable à l'unanimité du CNPN pour le projet de création d'une réserve naturelle nationale sur le secteur de Roques-Hautes.
- 01/03/1994 : décret portant création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire (RNSV).
- 02/12/1996 : arrêté préfectoral créant le comité consultatif de la RNSV.
- 10/08/2000 : création du Grand Site Sainte-Victoire.
- 04/04/2005 : installation du Comité consultatif de la RSNV. Le comité consultatif donne un avis favorable pour que la gestion soit confiée au CG 13. Sauveur Amico est nommé directeur de la RNSV.
- 10/03/2006 : arrêté ministériel portant désignation du site Natura 2000 montagne de Sainte-Victoire.
- 27/10/2008 : premier plan de gestion de la RNSV 2008-2013 (Collectif, 2008a-b).
- 29/01/2015 : arrêté préfectoral portant création du Conseil scientifique de la RNSV. Gilles Cheylan est élu président.
- 01/11/2015 : le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône (CD13) recrute Thierry Tortosa en tant que conservateur de la RNSV.
- 16/11/2015 : arrêté préfectoral renouvelant le Comité consultatif.
- 09/02/2016 : arrêté préfectoral approuvant le second plan de gestion de la RNSV 2016-2020.
- 04/04/2016 : renouvellement de la convention entre l'État et le CD 13 pour la gestion de la RNSV jusqu'en 2020.

## 5. UNE GESTION COLLÉGIALE, PRAGMATIQUE ET DYNAMIQUE

Pendant la durée de validité du plan de gestion, le Conseil général des Bouches-du-Rhône s'investit dans le suivi et la conservation de la réserve naturelle. La surveillance est poursuivie et renforcée. Plusieurs gardes départementaux sont commissionnés pour la police de l'environnement. Les animations se poursuivent. Un partenariat est mis en place avec l'Institut National de la Recherche Agronomique pour étudier les interactions entre les populations de chenilles processionnaires du pin et les mésanges. Des fouilles rassemblant l'Université de Provence, l'Université des sciences et techniques du Languedoc (USTL), le MHN d'Aix-en-Provence, sont entreprises dans les secteurs des Grands-Creux dégagés par l'érosion (Garcia, 1995). Le Conseil général demande au Pr. Jean Philip de dresser une carte géologique détaillée de la réserve naturelle.

La gestion de la réserve naturelle reste toutefois limitée dans certains de ces aspects faute d'un conservateur présent à temps complet. Ce manque se fait en particulier sentir à partir de 2013, lorsque le gestionnaire doit procéder à l'évaluation du premier plan de gestion et à la rédaction du deuxième plan.

Entre-temps, le ministère chargé de l'environnement publie, le 30 septembre 2010, une circulaire à laquelle est annexé un guide méthodologique consacré à la création et à la gestion des réserves naturelles nationales. Ainsi, en application de cette circulaire, sont arrêtées les dispositions suivantes :

- prolongation du plan de gestion jusqu'en 2015 pour permettre l'évaluation et la rédaction du 2<sup>e</sup> plan de gestion.
- création et installation du conseil scientifique de la réserve naturelle. Les membres du conseil scientifique étaient jusqu'à présent membres du comité consultatif (collège des personnalités scientifiques et qualifiées). L'individualisation du Conseil scientifique a permis d'y adjoindre des spécialistes de disciplines scientifiques qui n'étaient pas représentées.
- renouvellement du comité consultatif et limitation à 24 membres. Il comprend, de manière équilibrée, quatre collèges :
  - représentants des administrations civiles et militaires et des établissements publics de l'État ;
  - élus locaux représentant les collectivités territoriales et leurs groupements ;
  - représentants des propriétaires et des usagers
  - personnalités scientifiques qualifiées et représentants d'associations agréées ayant pour principal objet la protection des espaces naturels.
- désignation de la Société Publique Locale (SPL Terra13) pour coordonner et rédiger le 2<sup>e</sup> plan de gestion, avec le regard d'Angélique Monguillon, conservatrice de la Réserve Naturelle d'Hettange-Grande pour évaluer la pertinence des objectifs de gestion définis par le premier plan.
- rédaction du second plan de gestion et redéfinition des objectifs de gestion et de conservation comme suite à l'évaluation du premier plan (Cholley *et al.*, 2015a-c). Le second plan est validé fin 2015, et approuvé le 9 février 2016.
- recrutement de Thierry Tortosa, docteur en paléontologie et spécialiste des vertébrés du Crétacé supérieur de Provence, en tant que conservateur de la réserve naturelle.
- renouvellement de la convention de gestion entre l'État et le Conseil départemental des Bouches-du-Rhône le 4 avril 2016. Cette convention est établie pour 5 ans, en adéquation avec la durée du plan de gestion.

## 7. CONCLUSION

La création de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire a concrétisé la reconnaissance scientifique et la conservation d'un gisement paléontologique majeur de la fin du Crétacé. Elle est à l'origine d'une gestion durable de ce site, gestion qui donne une place importante à la recherche et à la diffusion de la connaissance scientifique.

Cette protection a été rendue possible grâce aux partenaires, État, collectivités, communauté scientifique, qui se mobilisent pendant de longues années et surmontent de nombreuses difficultés.

Aujourd'hui la gestion de cette réserve naturelle est en tout point conforme aux attentes convergentes de tous les acteurs qui, à un moment ou un autre, ont souhaité associer leurs compétences pour protéger le gisement paléontologique de Roques-Hautes. Les conservateurs des trois réserves naturelles nationales de PACA (RNN Géologique de Haute-Provence, RNN Géologique du Luberon et RNN de Sainte-Victoire) sont respectivement membres des trois comités consultatifs et participent aux travaux de leurs conseils scientifiques. Aix-Marseille Université, l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc (actuellement partie intégrante de l'Université de Montpellier), le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence sont membres du même conseil scientifique et s'associent régulièrement pour des travaux sur le site ou en laboratoire. Il en est de même pour le Conseil départemental, les communes, le Grand Site Sainte-Victoire, qui montrent un grand intérêt pour la conservation et la valorisation du site, au niveau local et à l'international.

Ainsi, les attentes des nombreuses personnes qui se sont mobilisées dans les années 1980 et 1990 sont maintenant récompensées. Le site de ponte d'œufs fossilisés de dinosaures est protégé, et des recherches récentes ont conduit à la découverte de squelettes de dinosaures. Le nouveau plan de gestion, outre la conservation du site, définit des objectifs de connaissance de la flore, de la faune et des habitats naturels. Prospector le passé lointain, et inventorier le patrimoine vivant actuel seront les axes de travail de l'équipe de la réserve naturelle pour les prochaines années.

## BIBLIOGRAPHIE

- Chevalier, B. (1987). Sur le flanc de la montagne Sainte-Victoire. La forêt départementale de Roques-Hautes. *In : Forêt méditerranéenne*, IX n°1 : 69 – 74.
- Cholley, B. et al. (2015a). *Plan de gestion de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire. Terra13 – CD 13. Section A : diagnostic de la réserve naturelle*. Document interne, 104 p.
- Cholley, B. et al. (2015b). *Plan de gestion de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire. Terra13 – CD 13. Section B : évaluation*. Document interne, 24p.
- Cholley, B. et al. (2015c). *Plan de gestion de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire. Terra13 – CD 13. Section C : objectifs*. Document interne, 17 p.
- Collectif (2008a). Plan de gestion 2008-2013. Phases 1 et 2. Document interne, 89 p.
- Collectif (2008b). Plan de gestion 2008-2013. Phase 3. Document interne, 60 p.
- Collot, L. (1880) *Description géologique des environs d'Aix-en-Provence*. Typographie Grollier, Montpellier, 234 p.
- Garcia, G. (1995). Les coquilles d'œufs de dinosaures de la coupe de Roque-Hautes Grand-Creux (bassin d'Aix-en-Provence) : diversité et applications biochronologiques. *Mémoire de DEA de l'Université de Montpellier II*. 49 p.
- Gomez, N. (1986). *Étude préalable pour la protection des gisements fossilifères de Sainte-Victoire*. Rapport du Conseil régional – DRAE PACA. 69 p.
- Gomez, N. (1989a). *Inventaire et parcellaire des sites à œufs de dinosaures de la Sainte-Victoire (Bouches-du-Rhône) en vue de leur protection*. Rapport de la RNNGHP/ARPE – DRAE PACA 25 p.
- Gomez, N. (1989b). *Compte rendu de la fouille paléontologique du 16 au 20 octobre 1989*. Rapport de la DRAE PACA. 8 p.
- Gomez, N. (1992). *Dossier pour la protection des sites paléontologiques du massif de Sainte-Victoire ; forêt départementale de Roques-Hautes (Bouches du Rhône)*. ADES 13 – DIREN PACA – RINGHP 54 p.
- Lapparent, A.-F. de (1947) Les dinosaures du Crétacé supérieur du Midi de la France. *Mémoire de la Société Géologique de France* : 1-67.
- Marcoul, J.-M. (1999). Sainte-Victoire perd les couleurs de Cézanne. *La Provence* 10/08/1999 p. 4.
- Martini, G. (1994). *Note de réflexion préparatoire à la réunion sur la gestion de la réserve géologique de Sainte-Victoire*. Document interne DIREN PACA. 7 p.



©Jean Philip

## JEAN PHILIP

*Professeur émérite au CEREGE,  
CNRS/IRD/INRA/Collège de France,  
Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence,  
France.*

### Mots-clés :

Géologie, Stratigraphie,  
Carte géologique,  
Crétacé supérieur,  
Miocène,  
Tectonique,  
Paléoenvironnements continentaux,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire

*Article reçu le 25 janvier 2017  
Article accepté le 22 mai 2020*

# GÉOLOGIE DE LA RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE

JEAN PHILIP

### Résumé :

La Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, située au pied de l'emblématique massif de Sainte-Victoire, présente un intérêt géologique majeur du fait de la variété de ses terrains sédimentaires et de son célèbre gisement à œufs de dinosauriens. Un rappel historique résume les recherches géologiques menées sur le territoire de la réserve depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Six formations continentales s'étageant du Crétacé supérieur (Campanien moyen-Maastrichtien) au Paléocène (Danien), ainsi qu'une formation marine datant du Miocène (Tortonien) sont décrites, illustrées et interprétées en termes de paléoenvironnements. Le territoire de la réserve comporte des accidents structuraux qui sont cartographiés, décrits et interprétés à la lumière du contexte tectonique régional. Une carte géologique est établie avec pour objectif de servir de base aux investigations géologiques et paléontologiques futures ainsi qu'aux présentations pédagogiques des terrains et des paysages.

### Abstract :

The Sainte-Victoire Nature Reserve, located at the foothill of the emblematic Sainte-Victoire mountain, presents a major geological interest due to the variety of its sedimentary field outcrops and its famous dinosaur's eggs fossil site. A historical overview summarizes the geological research carried out on the reserve area since the end of the 19th century. Six continental formations ranging from the Late Cretaceous (Middle Campanian-Maastrichtian) to the Paleocene (Danian) and a marine formation dating to the Miocene (Tortonian) are described, illustrated and interpreted in terms of paleoenvironments. The reserve area displays some important structural accidents which are mapped, described and interpreted in the light of the regional tectonic context. A geological map has been established in order to serve as a basis for future geological and paleontological investigations and for educational presentations of field outcrops and landscapes.

## 1. INTRODUCTION

Le site géologique de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire est principalement formé de terrains continentaux (calcaires, grès, marnes et conglomérats) du Crétacé supérieur (Campanien et Maastrichtien) et du Paléocène, affleurant largement au cœur de la Réserve, au sein du Domaine départemental de Roques-Hautes et ses environs. Des **molasses\*** marines rapportées au Miocène (Tortonien) sont présentes dans la partie nord-ouest du site (Barrage de Bimont). Des limons ou graviers, peu épais, du Quaternaire récent, tapissent le fond des vallons ou des dépressions.

La structure est celle d'un synclinal d'axe sensiblement orienté ouest-est (« synclinal interne » *sensu* Leleu, 2005). Le flanc sud, assez fortement relevé et faillé, constitue la Crête du Marbre. Le cœur du synclinal renferme les **argiles\***, **grès\***, **calcaires\*** et conglomérats (encart 1) des Grands-Creux. Le flanc nord est représenté par les conglomérats des Costes Chaudes s'appuyant en discordance sur le bâti jurassique de Bimont.

L'ensemble du dispositif est affecté de failles, les deux principales étant celles de Roques-Hautes et des Espinades, et d'un chevauchement, celui de la Crête du Marbre.

Nous présentons ci-après les caractères des principaux ensembles stratigraphiques et structuraux du site, représentés sur une carte à l'échelle du 1/12.500 (figure 1) et illustrés par des photographies de terrain.

### Encart 1 : Qu'est-ce qu'un conglomérat ?

Un conglomérat est une roche sédimentaire détritique formée pour 50% au moins de débris de roches de dimension supérieure à 2 mm. Ce terme regroupe les brèches sédimentaires (à éléments en majorité anguleux), les poudingues (à éléments arrondis ou galets) et tous leurs intermédiaires. Dans les unités conglomératiques de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, les brèches typiques sont rares. Le **lithofaciès\*** des conglomérats est formé généralement d'éléments calcaires émoussés à anguleux de taille moyenne de 3 cm à 10 cm, voire jusqu'à 50 cm liés par une matrice de siltite ou de calc-siltite argileuse rouge contenant parfois des granules ou des graviers (Leleu, 2005). Les éléments des conglomérats sont pour la plupart des débris de roches du Jurassique supérieur provenant de l'érosion de reliefs proches et amalgamés dans des coulées de débris jusqu'à leur milieu de dépôt.

## 2. HISTORIQUE

La première étude géologique de Roques-Hautes est l'œuvre de Louis Collot (1880) qui dédie un long paragraphe à la description des terrains de ce secteur, en donne une coupe structurale précise à l'échelle du 1/40.000 et une ébauche cartographique sur fond topographique en hachures à 1/80.000. Les contours levés par Collot sont portés sur la première édition (1889) de la carte géologique en hachures Aix-en-Provence à 1/80.000. Les travaux du grand géologue aixois feront autorité jusque vers le milieu du 20<sup>e</sup> siècle (Philip, 2012).

Ce n'est qu'avec l'apparition des fonds topographiques en courbes de niveau à 1/20.000 que de nouveaux relevés cartographiques plus précis vont pouvoir être effectués. Cette étape est abordée dès 1938 par Georges Corroy qui effectue ainsi de nouveaux levés de l'ensemble du massif de Sainte-Victoire. Les résultats de ses recherches sont publiés dans le Bulletin du service de la Carte géologique de la France (Corroy, 1957) et ses contours serviront à l'établissement de la 1<sup>ère</sup> édition de la carte géologique Aix-en-Provence à 1/50.000 éditée en 1959. Pour ce qui concerne la stratigraphie, Corroy s'appuie sur le cadre fixé par Collot et attribue au Paléocène (Danien-Thanéien) la série continentale de Roques-Hautes (voir chapitre 3, figure 2). Les conclusions stratigraphiques de Corroy sont remises en question dans les années 1950 par Raymond Dughi et François Sirugue qui mentionnent la découverte d'œufs fossilisés de dinosauriens et de fragments de coquilles dans les faciès silteux et gréseux des Grands-Creux (Dughi et Sirugue, 1957 ; chapitre 4). Ces fossiles vont servir aux chercheurs du musée d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence (Billerey *et al.*, 1959) pour dater les « brèches » de Sainte-Victoire, distinguant ainsi deux grands épisodes de mise en place liés à l'**orogénèse\*** du massif : l'un d'âge Bégudien-Rognacien, l'autre d'âge Montien-Thanéien (voir chapitre 3, figure 2).

En 1959 également, Dughi *et al.* montrent l'âge Rognacien de la barre calcaire de Roques-Hautes que Collot et à sa suite Corroy attribuaient au Montien (étage local considéré comme équivalent du Danien). Fernand Touraine (1961) clôt cet argumentaire biostratigraphique en indiquant la présence d'œufs de dinosauriens (nids et fragments de coquilles) dans la formation argileuse superposée à la barre calcaire de Roques-Hautes attestant ainsi de l'extension des terrains crétacés jusqu'à la limite inférieure des « brèches » des Costes Chaudes.

Ces nouvelles données vont conduire à rendre caduque une grande partie des attributions stratigraphiques de la première édition de la carte à 1/50.000 d'Aix-en-Provence. Conscient du problème, Corroy confie dès 1960 à deux de ses élèves, Jean-Pierre Durand et Claude Tempier, une révision cartographique du massif de la Sainte-Victoire et de la bordure nord du bassin de l'Arc en vue de l'établissement d'une deuxième édition de la feuille, conforme aux nouvelles datations. Cette dernière paraît en 1969. Dans l'intervalle, Durand et Tempier publient une étude détaillée du secteur de Roques-Hautes et du Tholonet et concluent, comme Billerey *et al.* à l'existence de deux grands épandages diachrones de « brèches », chacun en relation avec une phase tectonique du massif (Billerey *et al.*, 1959 ; Durand et Tempier, 1962). Les nouveaux levés conduisent également à une révision de la tectonique de l'ensemble du massif de la Sainte-Victoire (Corroy *et al.*, 1964).

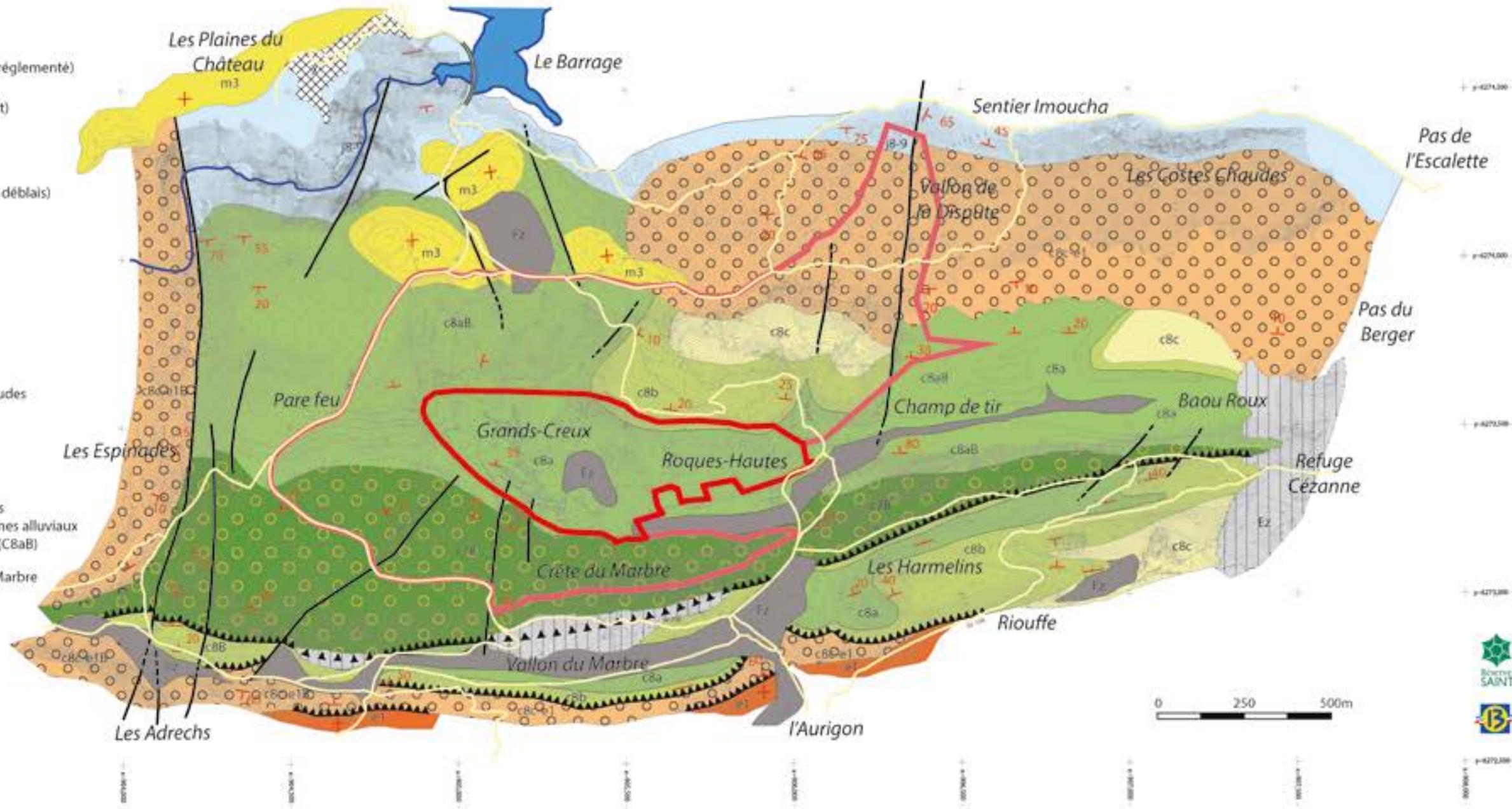
**Légende :**

- Limite de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire (Accès réglementé)
- Limite du Coeur de la Réserve (Accès strictement interdit)
- Pistes de DFCI et sentiers autorisés

<b>Quaternaire</b>			Dépôts anthropiques (remblais, déblais)
			Eboulis récents
			Alluvions récentes - Colluvions
<b>Tortonien</b>			Molasse calcaire
61,6 Ma	<b>Danien</b>		Siltites rouges
66 Ma	<b>Rognacien terminal</b>		Cônes alluviaux des Costes Chaudes et du Tholonet
	<b>Rognacien supérieur</b>		Siltites et calcaires
72,1 Ma	<b>Rognacien moyen</b>		Calcaires et marnes
	<b>Rognacien inférieur</b>		Siltites et grès de Roques Hautes et des Grands-Creux (C8a) et cônes alluviaux de Bimont et du Champs de Tir (C8aB)
80 Ma	<b>Campanien</b>		Cônes alluviaux de la Crête du Marbre
	<b>Béguézien</b>		
<b>Tithonien Kimméridgien</b>			Calcaires

	Faïlle		Pendage
	Chevauchement		Pendage vertical
			Pendage horizontal



Réalisation : Jean PHILIP (2016)  
Graphisme : Thierry TORTOSA



Figure 1 : Carte géologique de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire.

Les conclusions de Durand et Tempier concernant la stratigraphie des « brèches » de Roques-Hautes et du Tholonet sont contestées par Fernand Touraine (Touraine, 1964a-b, 1965), pour qui un âge unique (limite Crétacé-Éocène) des « brèches » doit être admis. Mais cette interprétation, en contradiction avec les données stratigraphiques du vallon de l'Infernet au nord du Tholonet (Durand et Tempier, 1962) ne fut pas retenue dans la deuxième édition de la feuille d'Aix-en-Provence. L'existence de deux unités de « brèches » (au moins dans le secteur du Tholonet et de Roques-Hautes) sera confirmée ultérieurement dans l'étude structurale du massif de Sainte-Victoire réalisée par Jean Chorowicz et Roberto Ruiz (1979, 1984).

Dans les années 2000, les « brèches » de Sainte-Victoire suscitent l'intérêt des sédimentologues de l'université de Strasbourg et font l'objet des travaux de thèse de Sophie Leleu (2005), dont les principaux résultats sont publiés (Leleu *et al.*, 2009). Leleu substitue au terme de « brèches » employé jusqu'alors, celui de « dépôts de cônes alluviaux » (encart 2) et montre que ces derniers « *sont variés et contiennent différents faciès de conglomérats mais également des faciès à lithologie\* plus fine* ».

#### Encart 2 : Qu'est-ce qu'un cône alluvial ?

Il s'agit d'une accumulation de sédiments détritiques s'étalant en éventail au débouché d'un cours d'eau. Les cônes alluviaux du Crétacé supérieur et du Paléocène du secteur de Roques-Hautes sont caractérisés principalement par des corps conglomératiques issus du démantèlement de l'anticlinal jurassique de Bimont en voie de surrection (conglomérats syntectoniques). Les éléments (galets, blocs) ont subi un transport (torrentiel) sur une courte distance et sur une pente forte, avant de s'étaler en contrebas dans la plaine alluviale. Certains de ces cônes alluviaux (Costes Chaudes) ont conservé leur pente originelle ; d'autres (Crête du Marbre) ont subi des déformations tectoniques après leur dépôt.

Ce travail est suivi d'une étude tectonique novatrice de Sainte-Victoire par Espurt *et al.*, 2012. S'appuyant sur une analyse microtectonique et des **coupes équilibrées\*** de l'ensemble du massif, cette étude a permis de déchiffrer l'architecture structurale profonde et la cinématique de Sainte-Victoire.

Afin de tenir compte de ces avancées, la Direction de l'environnement du Conseil Général des Bouches-du-Rhône confie en 2010 au Laboratoire de Géologie de l'Université de Provence, le soin de dresser une carte géologique détaillée du site de Roques-Hautes. Ce travail a fait l'objet d'un pré-rapport comportant notamment un document informatisé de la carte géologique à l'échelle du 1/25.000.

Le présent article apporte un certain nombre de précisions cartographiques au document initial ainsi que des compléments géologiques qui n'étaient pas mentionnés dans l'étude préliminaire.

## 3. STRATIGRAPHIE

### 3.1. CRÉTACÉ SUPÉRIEUR ET PALÉOCÈNE

#### 3.1.1. Cônes alluviaux du Bégudien de la Crête du Marbre

Nous désignons sous ce vocable la formation dessinant une barre qui s'allonge d'est en ouest et constitue la crête éponyme au sud de la réserve géologique (figure 1 et photo 1). Une coupe détaillée peut être dressée le long de la piste qui, au sortir du parc de stationnement de l'Aurigon, conduit à la ferme de Roques-Hautes. Les couches présentent un pendage moyen de 60° vers le nord. On distingue de bas en haut, au-dessus du contact de chevauchement est-ouest qui limite la barre au sud :

Niveau 1 : alternances de bancs **strato-croissants\*** de conglomérats et de siltites rouges à galets (30 m) (encart 3).

Niveau 2 : ensemble de bancs conglomératiques pluri-métriques séparés par des inter-lits de siltites à galets, formant une crête bien dessinée dans la topographie (50 m). Les éléments des conglomérats sont des galets ou des blocs de calcaire jurassique.

Niveau 3 : siltites grises à galets ou à granules (30 m) (photo 2).

Niveau 4 : siltites grises à granules avec marmorisations\* rouges vers le sommet (**paléosols\***) (15 m) (photo 3).

#### Encart 3 : Qu'est-ce qu'une siltite ?

C'est une roche sédimentaire détritique consolidée formée d'éléments (silts) de nature variée dont la granulométrie est comprise entre 1/16 mm (62,5 µm) et 1/256 mm (3,9 µm). Dans les terrains de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire les éléments détritiques sont formés en majorité de silts calcaires ou siliceux (quartz, micas), associés parfois à des minéraux argileux détritiques ou néoformés (siltites argileuses) ou à des granules, graviers et galets calcaires (siltites à granules, à galets, etc.). La couleur rouge est due à la présence d'oxydes de fer. Les sédiments silteux transportés par des cours d'eau se déposent sur des plaines d'inondations fluviales lors de périodes de crues.

Les différents faciès de la Crête du Marbre appartiennent au **Système des cônes alluviaux inférieurs (SCAI), sous-système SCAI(i)** de Leleu (2005) qui se suit sur 5 kilomètres du Tholonet au Baou Roux. Selon l'auteure, le SCAI(i) est formé d'un amalgame latéral de corps de cônes alluviaux. Chacun des corps a une extension latérale d'un kilomètre et une épaisseur d'environ 100 mètres. Touraine (1964a) a cité dans des « marnes calcaires gris rosé », qui pourraient correspondre au niveau 3 de notre coupe, une association de gastéropodes : *Cyclophorus heliciformis*, *Lychnus marioni*, *Bauxia disjuncta*, *Bauxia bulimoides*, *Viviparus beaumonti*, qu'il attribue au Bégudien et rapproche d'un niveau particulier des Alpilles connu sous le nom de « Niveau du Colombier ». Notons toutefois que ces citations n'ont pas reçu ultérieurement de confirmation. Touraine a signalé également des coquilles d'œufs de dinosauriens à divers niveaux de la formation conglomératique, mais sans plus de précision. Compte tenu de sa position stratigraphique, la formation a été attribuée au Bégudien (Durand et Tempier, 1962), équivalent du Campanien moyen, ou au Bégudo-Rognacien (Chorowicz et Ruiz, 1984). Pour Leleu (2005) et Espurt *et al.* (2012) l'âge du début du SCAI(i) serait Bégudien moyen et les dépôts appartenant à ce sous-système se poursuivraient jusqu'à la fin du Bégudien.



Photo 1 : Système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (i) du Bégudien de la Crête du Marbre vus des Harmelins. En arrière-plan : système des cônes alluviaux inférieurs du Rognacien inférieur du Champ de tir SCAI (ii) et système des cônes alluviaux supérieurs du Vitrollien des Costes Chaudes SCAS (ii).



Photo 2 : Siltites grises à galets et à granules. Niveau 3 de la coupe du système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (i) de la Crête du Marbre.



Photo 3 : Niveau 4 correspondant aux marmorisations (paléosol) affectant les siltites grises à granules et graviers.

### 3.1.2. Siltites et grès du Rognacien inférieur de Roques-Hautes et des Grands-Creux

Constituant le cœur de la Réserve, car très riche en œufs et ossements de dinosauriens, cette formation a fait récemment l'objet d'études paléontologiques et sédimentologiques très détaillées (Garcia et Vianey-Liaud, 2001 ; Cojan *et al.*, 2003 ; Leleu, 2005 ; Tortosa, 2014). Diverses coupes ont été établies, qui permettent de se faire une idée précise des séquences sédimentaires et des paléoenvironnements, ainsi que de leur variation dans l'espace. Par ailleurs, cette formation passe latéralement à deux ensembles conglomératiques : à l'ouest, il s'agit de l'unité conglomératique de Bimont, à l'est celle du Champ de tir.

Le **faciès\*** le plus caractéristique est constitué, sur une épaisseur d'environ 80 m, d'une alternance de couches de siltites argileuses rouges montrant des marmorisations jaunes et des structures nodulaires carbonatées. Ces couches sont fréquemment affectées de **bioturbations\*** verticales. Elles renferment de nombreuses coquilles d'œufs fossilisés de dinosauriens et dans certains niveaux des ossements. Ce faciès est particulièrement bien développé dans le secteur des Grands-Creux et au nord immédiat de la ferme de Roques-Hautes où de nombreux gisements d'œufs ont été exhumés. Le milieu de dépôt correspond à une plaine d'inondation fluviale soumise périodiquement à une exposition subaérienne génératrice d'un début de pédogenèse (Cojan *et al.*, 2003 ; chapitre 3).

Un faciès moins fréquent, représenté à la partie inférieure (Grands-Creux) ou à la partie supérieure (Roques-Hautes) de la formation est représenté par des bancs de grès ferrugineux à stratifications obliques (photo 4), organisés sous forme de lentilles d'épaisseur métrique se biseauant latéralement et renfermant parfois des fragments d'œufs de dinosauriens (photo 5). Il s'agit de faciès de type chenaux fluviaux recoupant périodiquement les limons de la plaine d'inondation.

Dans le secteur des Grands-Creux on note également, intercalé dans les siltites rouges de la partie inférieure de la coupe (photo 6), la présence d'un banc de calcaire **mudstone\*** (épaisseur 0,40 m, extension latérale 400 mètres) affecté de nombreuses traces racinaires verticales correspondant vraisemblablement à un dépôt de type **palustre\***.

Cette unité est considérée comme représentant le Rognacien inférieur, mis en équivalence avec les chrons C32R-C33N (partie supérieure) de l'échelle **paléomagnétique\***, d'âge campanien supérieur (Garcia et Vianey-Liaud, 2001 ; Cojan et Moreau, 2006 ; Tortosa, 2014).



Photo 4 : Stratifications obliques planes dans les grès du Rognacien inférieur de Roques-Hautes.



Photo 5 : Siltites rouges et banc gréseux massif à débris d'œufs de dinosauriens. Rognacien inférieur des Harmelins.



Photo 6 : Siltites rouges et lentilles carbonatées du Rognacien inférieur des Grands-Creux.

### 3.1.3. Cônes alluviaux du Rognacien inférieur de Bimont et du Champ de tir

Les **cônes alluviaux de Bimont** (photo 7) constituent un passage latéral vers l'ouest de la formation silteuse rouge des Grands-Creux. D'une épaisseur d'une centaine de mètres, ils reposent en discordance sur les cônes alluviaux de la Crête du Marbre (Leleu, 2005). A la partie inférieure, les bancs de conglomérats alternent avec des niveaux silteux rouges (photo 8) renfermant parfois des œufs de dinosauriens, qui se relie à la formation des Grands-Creux. Vers le haut, au contraire, les passées de conglomérats se succèdent avec une plus grande fréquence pour former un ensemble de corps amalgamés avec discordances internes, sans intercalations de dépôts silteux.

Les cônes alluviaux de Bimont appartiennent au **Système des cônes alluviaux inférieurs (SCAI), sous-système SCAI(ii)** de Leleu (2005). D'après l'auteure, l'apex des cônes alluviaux de Bimont est préservé sous forme d'une incision dans les calcaires du Jurassique affleurant au niveau du barrage éponyme et sur lesquels les conglomérats du SCAI(ii) reposent en discordance.



Photo 7 : Système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (ii) du Rognacien inférieur de Bimont. Noter les discordances internes et le passage latéral (à droite de la photo) aux siltites rouges des Grands-Creux (SGC).



Photo 8 : Siltites rouges à graviers et galets surmontés par des conglomérats dans le système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (ii) de Bimont.

Les **cônes alluviaux du Champ de tir** sont constitués de plusieurs ensembles conglomératiques bien marqués dans la topographie, de part et d'autre de la dépression quaternaire éponyme. Le premier ensemble, bordant au sud la dépression, repose sur les siltites à granules marmorisées terminant la séquence de dépôts de la Crête du Marbre. Il est formé de deux corps conglomératiques lenticulaires à fort pendage nord, séparés par (et interdigités dans) des dépôts (siltites rouges) de plaine alluviale.

Le second ensemble surplombe au nord l'ancien Champ de tir (photo 9). Il est constitué de corps conglomératiques amalgamés, de faible pendage nord (avec à certains niveaux intercalations de **calcrètes\***) qui se superposent sur une épaisseur d'une centaine de mètres. Ces corps s'interrompent, à l'ouest, contre la faille de Roques-Hautes et s'interdigitent à l'est avec des dépôts de siltites et de grès.

À l'instar des cônes alluviaux de Bimont, ceux du Champ de tir appartiennent au Système des cônes alluviaux inférieurs (SCAI), sous-système SCAI(ii), corps a, b, c de Leleu (2005) et dont l'apex se situait au nord dans le Jurassique des Costes Chaudes.



Photo 9 : Système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (ii) du Rognacien inférieur du Champ de tir. En arrière-plan, le système des cônes alluviaux supérieurs Vitrollien SCAS (ii) et soubassement Jurassique supérieur (JS) des Costes Chaudes.

### 3.1.4. Formation calcaire du Rognacien moyen de Roques-Hautes

Nous désignons sous cette appellation la barre calcaire culminant à 375 m qui surplombe au nord les marnes rouges et grès des Grands-Creux. Interrompue à l'est contre la faille de Roques-Hautes, cette barre s'observe aussi dans le secteur de Baou Roux, surmontant le corps conglomératique sommital (Rognacien inférieur) du Champ de tir. La formation (épaisseur 30 m) est constituée d'une alternance de séquences binaires :

- **calcaires wackestones\*** à débris de coquilles de mollusques d'eau douce)
- marnes sableuses à débris charbonneux, l'ensemble caractérisant un milieu lacustre de caractère réducteur.



Photo 10 : Faciès de la barre rognacienne affleurant le long de la piste de Roques-Hautes. Des bancs de calcaires lacustres, parfois couronnés par des horizons nodulaires ou racinaires, alternent avec des marnes charbonneuses. Le pendage des couches est dirigé vers le nord.

Dughi *et al.* (1959) ont cité dans les niveaux inférieurs de la formation, une riche faune de gastéropodes : *Melania ollierensis*, *Pyrgulifera armata*, *Palaeostoa cureti*, *Bauxia disjuncta*, *Bauxia bulimoides*, *Clausilia patula* associés à de grands *Unios* et dans les bancs marneux à des fragments de coquilles d'œufs fossilisés de dinosauriens. Selon Dughi *et al.*, *P. armata* et *Bauxia* seraient des formes très caractéristiques du Rognacien ce qui a conduit ces auteurs à considérer la formation calcaire de Roques-Hautes (initialement rapportée au Paléocène depuis les travaux de Collot), comme équivalente de la formation des Calcaires de Rognac. L'âge rognacien de cette formation a été retenu dans tous les travaux ultérieurs. Toutefois, compte tenu de la diachronie d'ouest en est des unités calcaires dans le Rognacien du Bassin de l'Arc, elle serait plutôt équivalente de la formation des Calcaires de Rousset (Garcia et Vianey-Liaud, 2001) située, selon ces auteures, à cheval sur la limite Campanien-Maastrichtien.

La réévaluation de l'âge des **anomalies magnétiques\*** de la fin du Crétacé (Gradstein *et al.*, 1995) a conduit Cojan et Moreau (2006) à situer le dépôt du Calcaire de Rousset durant la majeure partie du Chron 32 et la partie inférieure du Chron 31R de l'**échelle magnétostratigraphique\***. Par référence à l'échelle géochronologique internationale (2012), la limite Campanien-Maastrichtien (72,1Ma) se placerait dans la partie terminale de la formation des Calcaires de Rousset. Cette chronologie peut être étendue par corrélation à la formation calcaire de Roques-Hautes.

### 3.1.5. Siltites et calcaires du Rognacien supérieur

Reposant sur la formation calcaire de Roques-Hautes, se développe une trentaine de mètres de siltites argileuses lie-de-vin admettant à leur partie inférieure des passées décimétriques de conglomérats et à leur partie supérieure des intercalations de bancs calcaires à traces racinaires (photo 11).



Photo 11 : Siltites argileuses lie de vin et bancs de calcaires palustres intercalés. Rognacien supérieur de Roques-Hautes.

Des œufs de dinosauriens ont été cités dans la partie supérieure de la série (Touraine, 1961 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2001 ; Cojan *et al.*, 2003).

Cette formation a été corrélée aux « Argiles rutilantes supérieures » (Rognacien supérieur) du Bassin de l'Arc, considérées comme équivalentes du Maastrichtien (Cojan et Moreau, 2006). Garcia et Vianey-Liaud (2001) y citent *Megaloolithus mamillare*, une **ooespèce\*** également présente dans la même formation de la **coupe-type\*** de Rousset et caractéristique du Rognacien supérieur.

À Roques-Hautes, les dépôts terminaux du Rognacien du Bassin de l'Arc (formation du « Poudingue de la Galante ») ne sont pas représentés, soit qu'ils aient été érodés avant la mise en place des cônes alluviaux discordants des Costes Chaudes, soit qu'ils ne se soient pas déposés dans ce secteur.

### 3.1.6. Cônes alluviaux des Costes Chaudes (Rognacien terminal à Vitrollien)

Cette unité conglomératique repose en discordance cartographique : au nord sur le bâti jurassique des Costes Chaudes (auquel elle est superposée avec une forte discordance angulaire ; photo 12), au sud sur les dépôts silteux du Rognacien supérieur (Roques-Hautes, Baou Roux) ou sur les corps conglomératiques du Rognacien inférieur (Champ de tir) qu'elle recouvre en **dépôts progradants\*** successifs à pendage sud (photo 13). On l'observe également à l'ouest sur le plateau des Espinades (« Brèches » du Tholonet, *auct.*) où elle est en contact faillé avec les systèmes de cônes alluviaux de Bimont et de la Crête du Marbre. L'ensemble est constitué de corps conglomératiques amalgamés, à galets ou blocs de calcaire jurassique encroûtés par des *Microcodium\** (photos 14 et 15), ces organismes prenant ici un important développement. Des niveaux de calcrètes ou de siltites rouges s'y intercalent régulièrement. Il a été signalé (Touraine 1964a, Cojan *et al.*, 2003 ; Leleu, 2005) à la base de la formation des bancs **graveleux\*** rouges, mal cimentés, dans lesquels on trouverait encore des œufs de dinosauriens.

Les cônes alluviaux des Costes Chaudes appartiennent au **Système des cônes alluviaux supérieurs (SCAS), sous-système SCAS(ii)** de Leleu, 2005. Les données d'alignements de blocs dans les différents corps conglomératiques indiquent un écoulement nord-sud et une source au nord similaire à celle du SCAI (Leleu, 2005). Pour cette auteure, la présence de coquilles d'œufs de dinosauriens conduit à conférer un âge Rognacien terminal (Maastrichtien tardif) à la base des conglomérats des Costes Chaudes ; un âge Vitrollien (étage local mis en équivalence avec le Danien) est proposé pour le reste de la formation (voir chapitre 3, figure 2).



Photo 12 : Couches renversées vers le sud du Jurassique supérieur (JS) des Costes Chaudes vues du Pas de l'Escalette. En contrebas, conglomérats discordants du Vitrollien appartenant au Système des cônes alluviaux supérieurs SCAS (ii).



Photo 13 : Architecture en éventail des corps alluviaux du système des cônes alluviaux supérieurs SCAS (ii) des Costes Chaudes ; noter les différences de direction de pendage entre les couches conglomératiques du SCAS (ii) et celles du système des cônes alluviaux inférieurs (ii) du Champ de tir, d'âge Rognacien inférieur. Le sud est à gauche de la photographie.



Photo 14 : Alternances de siltites rouges et de bancs conglomératiques dans le système des cônes alluviaux supérieurs SCAS (ii) du Vitrollien des Espinades.



Photo 15 : Détail des conglomérats du système des cônes alluviaux supérieurs SCAS (ii) des Espinades montrant l'encroûtement des galets par des couches successives rubanées de Microcodium.

### 3. 2. MIOCÈNE

Sur le territoire de la réserve naturelle, le Miocène est représenté par une série marine peu épaisse, attribuée au Tortonien, reposant sur une surface plane d'érosion sous-marine avec perforations d'organismes *lithophages*\* (photos 16 et 17) créée lors de la transgression de la mer miocène sur la bordure ouest du massif de la Sainte-Victoire. Les premiers dépôts sont représentés par des grès molassiques jaunâtres qui remplissent des cavités d'érosion affectant la surface de transgression. Au-dessus se placent quelques mètres de calcaires bioclastiques en petits bancs (photo 17) renfermant des débris de coquilles de bivalves, d'échinodermes et d'algues mélobésiées. La série se termine par un banc de calcrète à traces racinaires, très karstifié\*.

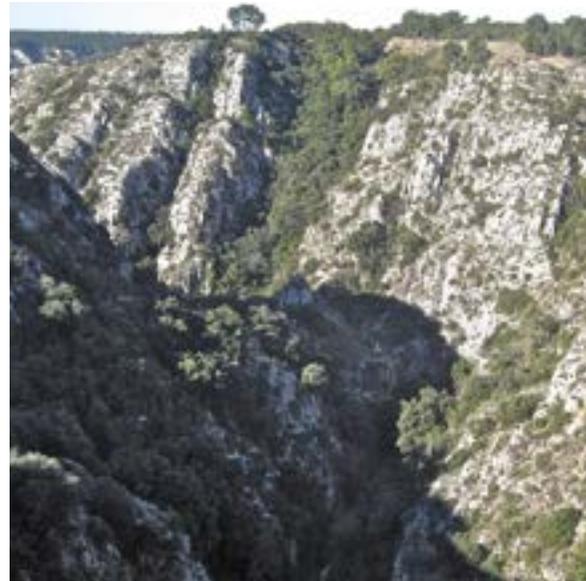


Photo 16 : Couches verticales du Jurassique supérieur de Bimont tronquées par la paléosurface plane d'abrasion sous-marine du Miocène.



Photo 17 : Bancs de molasse tortonienne reposant sur la paléosurface d'abrasion\* sous-marine (S) tronquant les conglomérats vitrolliens (sentier ouest du Barrage de Bimont).

### 4. TECTONIQUE

#### 4. 1. LE CHEVAUCHEMENT DE LA CRÊTE DU MARBRE

Ce chevauchement, de direction sensiblement est-ouest, et de vergence sud, se suit d'une manière continue depuis le secteur des Harmelins à l'est jusqu'à l'aqueduc de Doudon à l'ouest (figure 1), puis au-delà jusqu'au vallon de l'Infernet où il a été reconnu et décrit pour la première fois par Durand et Tempier (1962) puis étudié par Chorowicz et Ruiz (1979, 1984) et enfin Leleu (2005). Dans ce secteur il existe un pli anticlinal déversé au sud, affectant les conglomérats bégudiens du SCAI, à charnière cassée par une faille inverse. Cette dernière se poursuit au pied de la Crête du Marbre jusqu'aux Harmelins. Entre l'aqueduc de Doudon et Roques-Hautes, les conglomérats de la Crête du Marbre sont fortement redressés et chevauchent les siltites argileuses et grès du Rognacien inférieur renversés du Vallon du marbre, renfermant *Megaloolithus siruguei* (M. Vianey-Liaud, communication personnelle). Aux Harmelins, le compartiment chevauché montre deux replis anticlinaux parallèles, dont l'un très aigu, séparés par un repli synclinal, bien dessinés dans le calcaire rognacien (photo 18) surmontant les grès et siltites rouges du Rognacien inférieur (photo 5).



Photo 18 : Vue d'ensemble de la Réserve Naturelle Nationale de Roques-Hautes et de ses alentours. JS : soubassement du Jurassique supérieur ; c7 Br : cônes alluviaux du Bégudien ; c8a : siltites rouges du Rognacien inférieur ; c8a Br : cônes alluviaux du Rognacien inférieur ; c8b : barre calcaire du Rognacien moyen ; e1Br : cônes alluviaux du Vitrollien. Noter les replis anticlinaux et synclinaux affectant le Rognacien des Harmelins ; la faille de Roques-Hautes est matérialisée par son tracé.

Espurt *et al.* (2012), confèrent à ce chevauchement une ampleur importante et le raccordent en profondeur à un accident cisailant plat à vergence sud passant sous le synclinal interne de Roques-Hautes décollé et transporté vers le sud sur le synclinal de l'Arc.

Au vallon de l'Infernet, les conglomérats du Système des cônes alluviaux supérieurs (SCAS) reposent en discordance angulaire sur le pli-faille affectant les conglomérats du SCAL, ce qui apporte la preuve d'une mise en place **syndéformative**\* de ce pli, du chevauchement de la Crête du Marbre et des replis des Harmelins, lors d'une phase tectonique ayant affecté la Montagne Sainte-Victoire avant le dépôt du SCAS. Pour Leleu (2005), le chevauchement de la Crête du Marbre est actif durant l'intervalle entre le dépôt du SCAL(i) de la Crête du Marbre et le dépôt du SCAL(ii) de Bimont et durant toute la durée de ce dernier comme l'attestent les discordances angulaires internes qui l'affectent. Selon l'auteure, le chevauchement est un accident de surface non enraciné qui prend naissance au front du pli de Bimont en activité pendant la sédimentation des cônes alluviaux. Le chevauchement aurait rejoué puis se serait redressé lors du serrage éocène.

## 4.2. LES FAILLES

### 4.2.1. Faille de Roques-Hautes

Il s'agit d'une faille de direction subméridienne (Nord 15) à pendage sub-vertical, affectant les terrains du Bégudien et du Rognacien de Roques-Hautes (photo 18), du Danien et du Jurassique supérieur des Costes Chaudes. Pour Leleu (2005) cet accident se prolongerait au sud jusque dans les terrains éocènes du Bassin de l'Arc.

La faille de Roques-Hautes (photos 18 et 19) a joué en faille normale (photo 20) avec effondrement du compartiment ouest de quelques dizaines de mètres, consécutivement à la distension oligocène (Espurt *et al.*, 2012).



Photo 19 : Faille normale de Roques-Hautes dans les conglomérats du système des cônes alluviaux inférieurs SCAL (ii) Rognacien inférieureur du Champ de tir.



Photo 20 : Plan strié de direction N 170° et pendage 65° O dans la zone de faille normale de Roques-Hautes (Champ de tir).

Elle a également joué en décrochement comme l'indique à Roques-Hautes dans les conglomérats du Champ de tir l'existence de stries peu inclinées sur certains plans de friction (photo 21) et le décalage horizontal de la barre du Jurassique supérieur des Costes Chaudes. Ce jeu décrochant pourrait être lié aux mouvements de compression de la phase pyrénéo provençale qui ont affecté en plusieurs épisodes la Montagne Sainte-Victoire entre le Campanien et l'Eocène (Lacombe *et al.* 1992), et/ou plus tardivement au Miocène. Pour Leleu (2005), la faille de Roques-Hautes a probablement influencé le dépôt et l'espace d'accommodation des cônes alluviaux SCAL(ii) du Champ de tir dont l'extension vers l'ouest est limitée par l'accident. Elle pourrait aussi avoir joué un rôle de découplage en termes de déformation entre le compartiment chevauché des Harmelins (photo 18) d'une part et celui du Vallon du marbre d'autre part.



Photo 21 : Plan strié de direction N 70° et pendage sub-vertical dans la zone de faille de Roques-Hautes (Champ de tir) et indiquant un mouvement de décrochement orienté sensiblement ouest-est.

### 4.2.2. Le faisceau d'accidents des Espinades

Le principal d'entre eux est un accident subméridien qui met en contact à l'est le Jurassique supérieur de Bimont, les conglomérats rognaciens de Bimont et ceux de la Crête du Marbre avec les conglomérats daniens des Espinades à l'ouest. D'autres failles, affectant la formation conglomératique de la Crête du Marbre et les terrains des Grands-Creux s'observent à l'est de cet accident majeur (photo 22). Le faisceau de failles des Espinades est reconnu comme le prolongement vers le nord de la faille de Meyreuil dans le bassin de l'Arc (Gaviglio et Gonzalès, 1987). Ces failles ont joué en failles normales sans doute au cours de la distension oligocène (Espurt *et al.*, 2012). Elles ont aussi joué en décrochement, vraisemblablement au cours de la phase compressive pyrénéo-provençale, à l'instar de la faille de Meyreuil dont elles sont le prolongement (Gaviglio et Gonzalès, 1987 ; Lacombe *et al.*, 1992). Pour Leleu (2005), la faille méridienne des Espinades aurait eu un jeu syndéformative et provoqué la déformation des cônes alluviaux de la Crête du Marbre avant le dépôt de ceux du Tholonet.



Photo 22 : Faille normale des Grands-Creux affectant la partie supérieure des conglomérats du système des cônes alluviaux inférieurs SCAI (ii) bégudiens de la Crête du Marbre.

### 4.2.3. Les failles post-miocènes

Il s'agit d'accidents mineurs de très faible rejet (de l'ordre du mètre) et de faible extension, qui affectent les terrains miocènes au sud du barrage de Bimont. Les accidents subméridiens pourraient correspondre au rejeu des failles qui affectent la Crête du Marbre. Les accidents est-ouest (photo 23) ou sud-ouest/nord-est sont des failles normales dont les deux principales délimitent les affleurements de Miocène du plateau de Bimont préservés ainsi dans une sorte de cuvette. Ce dispositif structural indique qu'une distension de direction sensiblement nord/sud a affecté le massif de Sainte-Victoire après le Tortonien.



Photo 23 : Faille normale de direction sensiblement ouest-est à regard nord affectant les molasses du Tortonien (sud du Barrage de Bimont).

## 5. CONCLUSIONS

À l'instar de ses gisements d'œufs fossilisés de dinosauriens, la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire recèle également des formations et des structures géologiques qui s'avèrent d'un intérêt majeur. L'historique des recherches a montré que de nombreux problèmes inhérents à la stratigraphie et à la tectonique du massif de Sainte-Victoire ont été résolus grâce à des observations effectuées sur le site de la réserve naturelle ou ses environs immédiats. Grâce au lever d'une carte géologique détaillée à 1/12.500 et à de nombreuses coupes, il a été possible de décrire avec précision les formations géologiques et les accidents structuraux qui les affectent.

Ces formations fournissent des clés importantes pour la connaissance de l'évolution paléogéographique et structurale du massif de Sainte-Victoire de la fin du Crétacé au début du Tertiaire.

La qualité des affleurements, des coupes géologiques, des objets sédimentaires (particulièrement les systèmes de cônes alluviaux) et structuraux (failles, chevauchements) justifie amplement leur préservation et leur mise en valeur au sein de la réserve naturelle.

Des recherches plus approfondies devraient permettre à l'avenir de préciser certaines questions, notamment d'ordre stratigraphique et d'étendre les levés cartographiques à d'autres secteurs du massif de Sainte-Victoire.

## Bibliographie

- Billerey A., Dughi R. et Sirugue F. (1959). Les œufs de Dinosaures et la datation des brèches de Sainte-Victoire. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 248 : 272-274.
- Chorowicz J. et Ruiz R. (1979). Observations nouvelles sur la structure des « brèches » de Sainte-Victoire (Provence). *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 268 : 207-210.
- Chorowicz J. et Ruiz R. (1984). La Sainte-Victoire (Provence) : observations et interprétations nouvelles. *Géologie de la France* 4, 41-55.
- Cojan I. et Moreau M.-G. (2006). Correlation of terrestrial climatic fluctuations with global signals during the Upper Cretaceous-Danian in a compressive setting. *Journal of Sedimentary Research* 76 : 589-604.
- Cojan I, Renard M. et Emmanuel L. (2003). Palaeoenvironmental reconstruction of dinosaur nesting sites based on a geochemical approach to eggshells and associated palaeosols (Maastrichtian, Provence Basin, France). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 191 : 111-138.
- Collot L. (1880). *Description géologique des environs d'Aix-en-Provence*. Typographie Grollier, Montpellier, 234 p.
- Corroy G. (1957). La Montagne Sainte-Victoire. *Bulletin de la carte géologique de la France* 251, LV : 1-46.
- Corroy G., Durand J.P. et Tempier C. (1964). Evolution tectonique de la Montagne Sainte-Victoire en Provence. *Bulletin de la Société géologique de France* (7) VI : 91-106.
- Dughi R. et Sirugue F. (1957). La limite supérieure des gisements de Dinosauriens dans le bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 245 : 907-909.
- Dughi R., Rey R., et Sirugue F. (1959). La limite supérieure du Crétacé continental dans le bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 249, 2370-2372.
- Durand J.-P. et Tempier C. (1962). Etude tectonique de la zone des brèches du massif de Sainte-Victoire dans la région du Tholonet. *Bulletin de la Société géologique de France* (7) IV : 97-101.
- Espurt N., Hippolyte J.-C., Saillard M. et Bellier O. (2012). Geometry and kinematic evolution of a long-living foreland structure inferred from field data and cross section balancing, the Sainte-Victoire System, Provence, France. *Tectonics* 31 (4), p. 937.
- Garcia G. et Vianey-Liaud M. (2001). Dinosaur eggshells as biochronological markers in Upper Cretaceous continental deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 169 : 153-164.
- Gaviglio P. et Gonzalès J.-F. (1987). Fracturation et histoire tectonique du bassin de Gardanne. *Bulletin de la Société géologique de France* (8), III, 4 : 675-682.
- Gradstein F. M., Agterberg F. P., Ogg J. G., Hardenbol J., Van Veen P., Thierry J. et Huang Z. (1995). A triassic, jurassic and cretaceous time-scale. In : Geochronology, time-scales and global stratigraphic correlation, Berggren W. A., Kent D. V., Aubry M.P. et Hardenbol J. (Eds). *Society for Sedimentary Geology Special publication* 54, p. 95-126.
- Lacombe O., Angelier J. et Laurent P. (1992). Determining paleostress orientations from faults and calcite twins: a case study near the Sainte-Victoire Range (southern France). *Tectonophysics* 201 : 141-156.
- Leleu S. (2005). *Les cônes alluviaux Crétacé supérieur/Paléocène en Provence : traceurs de l'évolution morpho-tectonique des stades précoces de collision*. Thèse de doctorat de l'Université de Strasbourg, 222 p.
- Leleu S., Ghienne J.-F. et Manatschal G. (2009). Alluvial fan development and morpho-tectonic evolution in response to contractional fault reactivation (Late Cretaceous-Paleocene), Provence, France. *Basin Research* 21 : 157-187.
- Philip J. (2012). *L'exploration géologique de la Provence : deux siècles et demi de débats et de controverses*. Presses des Mines. Histoire, sciences et sociétés, Paris. 366 p.
- Tortosa T. (2014). *Vertébrés continentaux du Crétacé supérieur de Provence (Sud-Est de la France)*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 582 p.
- Touraine F. (1961). Nouveau gisement d'œufs de Dinosaures à Roques-Hautes (Bouches-du-Rhône). *Comptes rendus sommaires des séances de la société géologique de France*, p. 265-266.
- Touraine F. (1964a). Sur la datation des brèches de la montagne Sainte-Victoire près d'Aix-en-Provence. *Bulletin de la Société géologique de France* (7) VI : 127-133.
- Touraine F. (1964b). Les grands traits d'une structure nouvelle proposée pour le massif de Sainte-Victoire. *Bulletin de la Société géologique de France* (7) VI : 545-553.
- Touraine F. (1965). Phases terminales et tectogenèse de la montagne Sainte-Victoire. *Bulletin de la Société géologique de France* (7) VII : 59-63.



©Thierry Tortosa

## ISABELLE COJAN

*MINES ParisTech, Paris Sciences & Lettres university, Geosciences, 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France.*

### Mots-clés :

Sédimentologie,  
Géochimie isotopique,  
Paléosols,  
Paléoclimats,  
Oeufs de dinosauriens,  
Crétacé terminal,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

*Article reçu le 20 décembre 2017  
Article accepté le 24 mai 2020*

# LES SOLS ET PAYSAGES DE PROVENCE AU CRÉTACÉ TERMINAL

## ISABELLE COJAN

### Résumé :

Ces travaux montrent l'apport des observations sédimentologiques, minéralogiques et géochimiques à la restitution des paléo-paysages dans des milieux continentaux où la préservation des restes végétaux est rendue difficile par des conditions de préservation très inféodées aux milieux aquatiques.

À partir d'un cadre stratigraphique précis, ces études ont permis d'effectuer une comparaison des enregistrements climatiques des séries continentales du Crétacé supérieur (Campanien et Maastichtien) de Provence avec les fluctuations climatiques globales enregistrées dans les sédiments marins. Cinq périodes semi-arides ont ainsi été mises en évidence, montrant des conditions climatiques proches de celles du Sud de l'Australie. Les restitutions paléocécologiques combinant les données minéralogiques et isotopiques des paléosols et des œufs de dinosauriens ont montré l'existence d'un comportement sédentaire des femelles avant la période de ponte.

### Abstract :

This study presents the contribution of sedimentary, mineralogical and geochemical observations to the reconstruction of paleo-landscapes in continental environments where the preservation of plant remains is made difficult due to the conditions of preservation linked to aquatic environments.

Using a high resolution age model, these studies made possible to compare the climatic records of the Upper Cretaceous continental series (Campanian and Maastichtian) of Provence with the global climatic fluctuations recorded in marine sediments. Thus, five semi-arid periods were highlighted, showing climatic conditions similar to those in modern southern Australia. Palaeoecological reconstruction combining mineralogical and isotope data from palaeosols and dinosaur's eggs shows the existence of sedentary behavior of females before the laying period.

## 1. INTRODUCTION

Les séries d'âge Crétacé supérieur (Campanien et Maastrichtien) de la région d'Aix-en-Provence sont majoritairement composées de formations de couleur rouge orangé entrecoupées de falaises blanches qui structurent les paysages de cette région : les calcaires de Rognac, de Vitrolles ou du Cengle (photo 1). Les sites riches en restes fossiles permettent de reconstruire les environnements des périodes passées à partir des assemblages d'espèces animales et végétales qui ont été extraites. Toutefois ces restitutions restent limitées à des horizons particuliers favorables à la préservation du matériel fossile.

La restitution des paysages dans leur ensemble nécessite d'intégrer des observations sédimentologiques, minéralogiques et géochimiques qui apportent des éléments complémentaires aux informations fournies par les sites fossilifères.

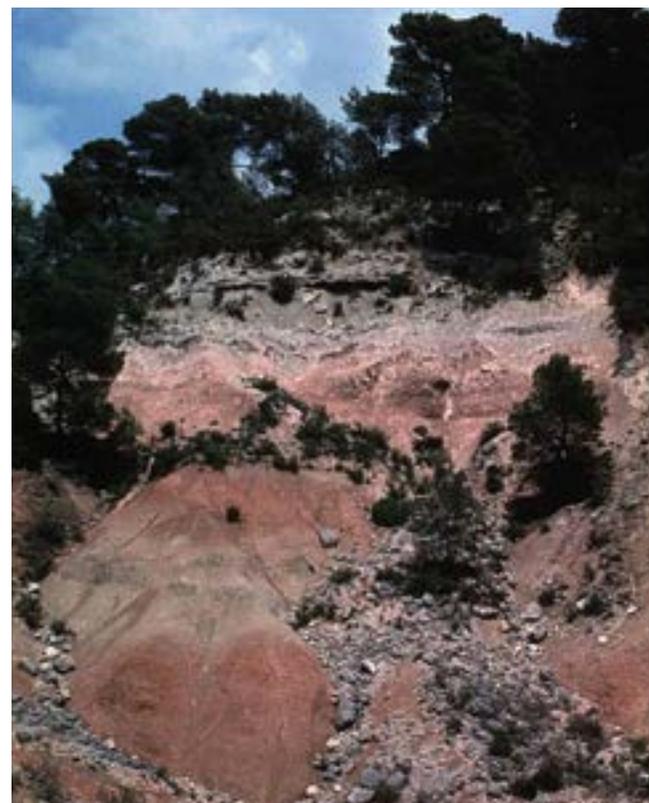


Photo 1 : Le site de Roques-Hautes et ses limons rouges dominés par les niveaux gris de la formation des Calcaires de Rognac. Au premier plan, en bas de la coupe, le niveau rouge avec des taches blanches correspond à un paléosol\* riche en concrétions carbonatées.

## 2. LE CADRE STRATIGRAPHIQUE ET LE CONTEXTE PALÉOGÉOGRAPHIQUE DE LA PROVENCE À LA FIN DU CRÉTACÉ SUPÉRIEUR

Le cadre stratigraphique des séries continentales de Provence a pendant longtemps reposé sur la biostratigraphie. Dans ces séries continentales, la distribution des fossiles est très liée aux faciès. Les faciès\* lacustres\* sont les plus favorables à la préservation des fossiles (charophytes\*, gastéropodes, pollens) alors que les limons de débordement ne contiennent généralement que des œufs de dinosauriens. Des étages continentaux ont ainsi été définis à partir des données des séries du Sud de la France (Babinot et Durand, 1980a-b ; figure 1).

Cependant, les résultats de magnétostratigraphie publiés sur ces séries ont remis en question les corrélations de ces étages régionaux avec l'échelle marine (Westphal et Durand, 1990) et conduit en combinaison avec la chimiostratigraphie à l'établissement d'un cadre stratigraphique rattaché aux échelles marines (Cojan et Moreau, 2006). Ainsi, la limite K/Pg a pu être placée pour la première fois dans le Bassin de l'Arc avec une précision de quelques mètres, ce qui ouvre la possibilité de nouvelles investigations sur la recherche de traces éventuelles de produits liés à un impact de la météorite (Cojan et al., 2000).

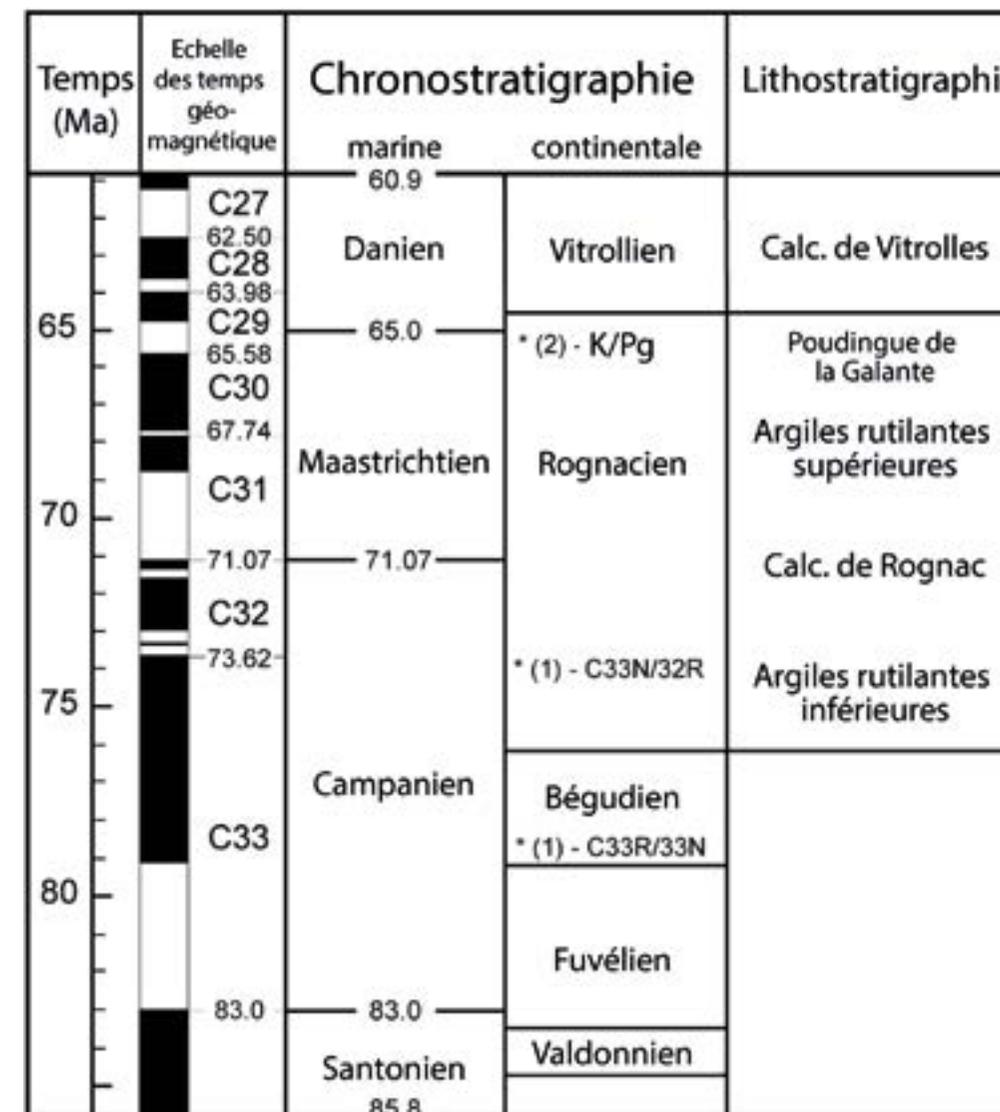


Figure 1 : Cadre stratigraphique des séries continentales du Crétacé terminal de Provence (d'après Cojan et Moreau, 2006) avec les données provenant de : 1) Westphal et Durand, 1990 ; 2) Cojan et al., 2000.

Au cours du Crétacé terminal/Paléogène inférieur, la région d'Aix-en-Provence correspondait à une large plaine d'inondation dans laquelle s'écoulait un cours d'eau qui trouvait sa source vraisemblablement dans le massif des Maures comme en témoigne la nature du matériel détritique (Durand et Guieu, 1980) et se jetait dans un lac situé au niveau d'Aix-en-Provence. Cette large plaine alluviale était bordée par des reliefs au nord (massif « Paléo-Sainte-Victoire ») et au sud (massif « Paléo-Étoile ») qui alimentaient des cônes alluviaux se développant au pied de ces reliefs et dont on peut observer aujourd'hui les niveaux conglomératiques riches en galets calcaires plus particulièrement sur la bordure sud du massif de Sainte-Victoire (figure 2).

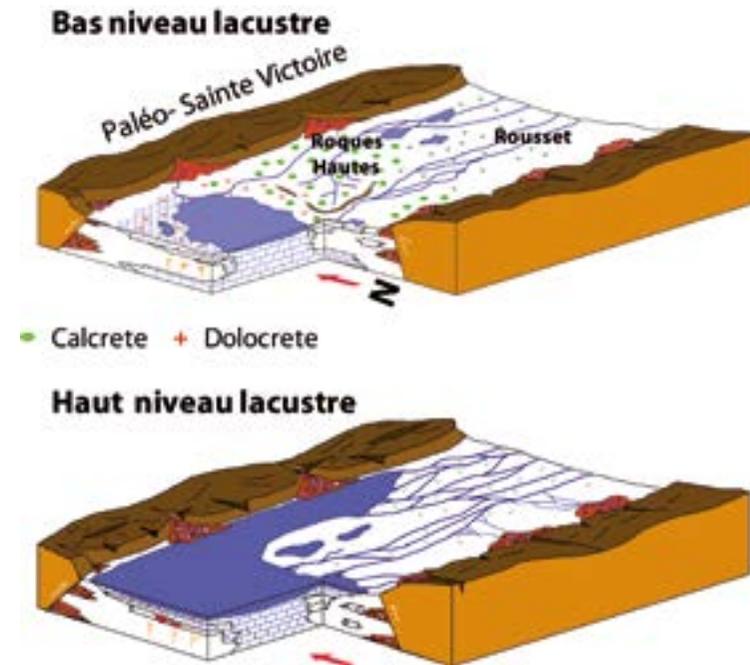


Figure 2 : Reconstitutions paléogéographiques du bassin d'Aix-en-Provence au Crétacé terminal (d'après Cojan, 1993).

Les dépôts lacustres qui s'intercalent régulièrement dans la série correspondent à des couches carbonatées dont l'extension très variable traduit les migrations de large amplitude des rives des paléolacs. La faible tranche d'eau de ces lacs, de l'ordre de quelques mètres, témoigne d'un modelé peu marqué des reliefs. Celui-ci a constitué un milieu très favorable à l'enregistrement des déformations du substrat ou à des changements de conditions hydrologiques conduisant à des variations conséquentes de l'étendue des masses d'eau.

Les faciès de plaine d'inondation, ces séries rouges que l'on observe aujourd'hui, comportent peu de remplissages de chenaux constitués de grès. Cette faible représentation de la bande active des anciens cours d'eau est attribuée à une faible divagation de leurs lits qui occupaient une position assez axiale dans le bassin, aujourd'hui érodée. Les argilites rouges, dépôts de crue qui ont contribué à la construction de la plaine d'inondation ainsi que les dépôts carbonatés lacustres comportent de nombreux horizons de **pédogenèse\*** correspondant à des **calcisols\*** modernes qui se distinguent par la présence d'un horizon d'accumulation de nodules carbonatés, souvent décrits comme des poupées calcaires. Ces sols fossiles constituent des archives précieuses pour la restitution des conditions climatiques passées.

### 3. LES PALÉOSOLS, UN OUTIL DE DÉCRYPTAGE DES SÉRIES PAUVRES EN FOSSILES

L'analyse des sols fossiles montre que les caractéristiques originales des sols sont très souvent préservées et que l'on retrouve des caractéristiques comparables à celles des sols actuels.

Les processus pédogénétiques affectent à des degrés variables les sédiments associés aux différents milieux de dépôts : les limons de crue dans la plaine d'inondation, les faciès carbonatés en bordure des lacs appelés dépôts palustres. En Provence, la majorité de ces paléosols est caractérisée par la présence de nodules calcaires qui soulignent des structures prismatiques verticales. Ces nodules nous renseignent sur les processus qui ont régné lors du développement du sol (figure 3) : les carbonates abondants dans les différents matériaux parentaux ont ainsi migré vers le bas des profils des sols à la faveur de climats marqués par une alternance de périodes humides et sèches qui favorisent successivement la dissolution des carbonates puis leur précipitation dans l'horizon calcique (Bc) souvent appelé calcrète. A l'affleurement, l'horizon calcique revêt toujours un aspect irrégulier dû à la résistance à l'altération différentielle des nodules carbonatés et des masses argileuses présentes entre ces nodules (photo 2). Dans l'horizon situé juste au-dessus, l'horizon d'accumulation riche en argile (Bt), des revêtements argileux (*cutans*) ont été déposés grâce aux circulations d'eau dans les fissures présentes dans le sol (Brewer, 1976). Dans certains sols, des surfaces de glissement (*slickensides*) sont associées à ces revêtements argileux et se forment au cours des cycles de gonflement et de rétraction des argiles lors de l'alternance de périodes sèches et humides.

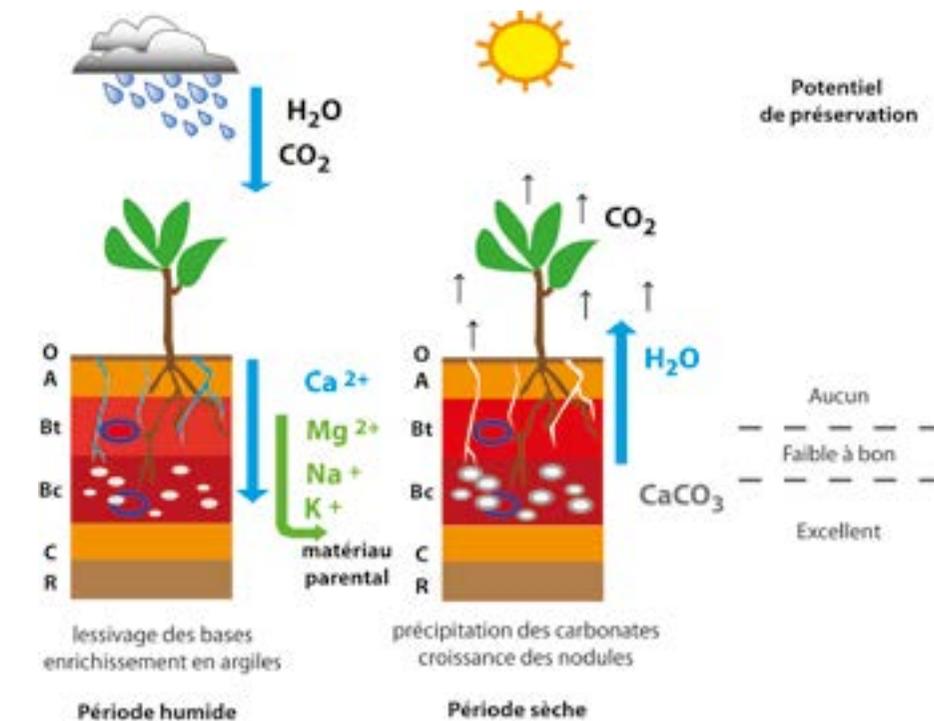


Figure 3 : Formation d'un calcisol. Ce type de sol se développe sous des climats qui présentent une alternance de périodes humides (qui favorisent l'altération des minéraux) et sèches (au cours desquelles, les minéraux dissous, calcaire par exemple, reprécipitent).



Photo 2 : Horizon d'accumulation des carbonates (Bc) d'un paléosol (le marteau donne l'échelle). Voir la figure 3 pour la position de l'horizon Bc.

Les calcrètes fossiles correspondent à l'horizon du sol dont la préservation a été facilitée par les cimentations carbonatées qui limitent l'érosion par déflation (vent) ou ruissellement (eau). Les premiers stades d'accumulation de carbonates correspondent à de petits enduits carbonatés sur des grains, puis à de discrètes concrétions de carbonates tendres à très durs qui évolueront au cours du temps vers des nodules coalescents donnant naissance à des faciès alvéolaires puis des cuirasses.

Un autre élément typique de ces sols est le rubanement qui résulte de l'accumulation des hydroxydes de fer dans l'horizon d'accumulation riche en argile Bt (figures 3 et 4). Bien que le sommet de ces anciens sols n'ait jamais été préservé, on observe souvent la succession des couleurs suivante : une augmentation vers le bas de l'intensité des tons rouges (du jaune-orange vers le rouge sombre) puis une gradation inverse jusqu'aux matériaux parentaux de couleur brun-gris vert pour les limons et blanc pour les dépôts lacustres.

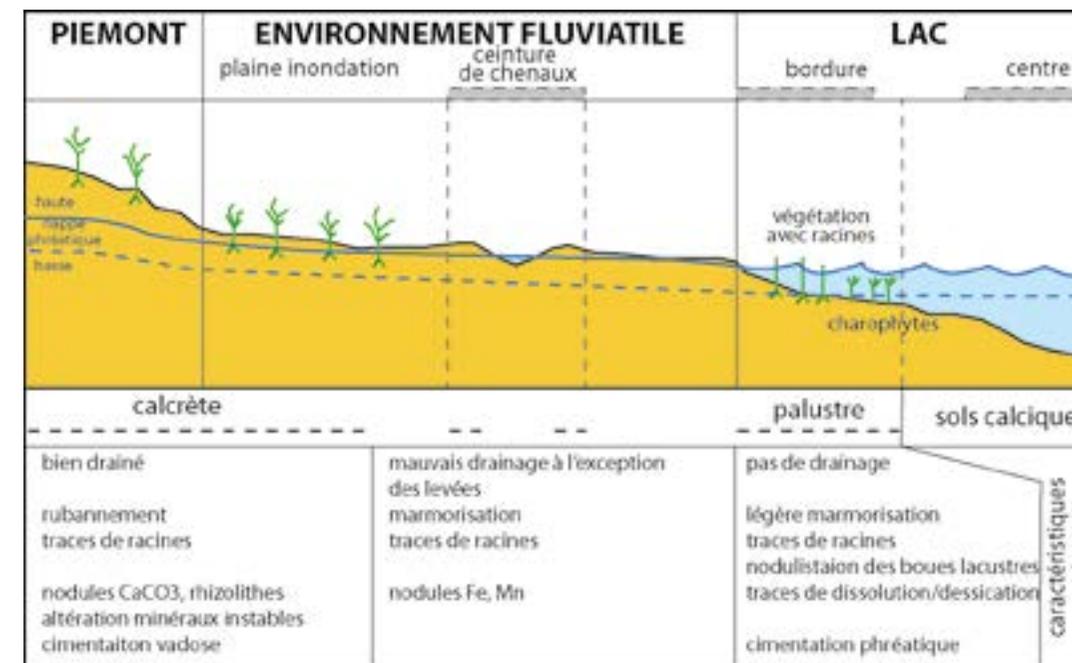


Figure 4 : Caractéristiques majeures de la pédogenèse en fonction des environnements (d'après Cojan, 1999).

Les traces de racines représentent un des éléments les plus courants des paléosols de Provence. Elles correspondent à la partie la mieux préservée des plantes puisque dans ces séries des macro-restes de plantes n'ont jamais été trouvés dans les dépôts de plaine d'inondation. Les traces de racines sont en général verticales, de largeur irrégulière et montrent de nombreuses radicelles (photo 2). Des halos faiblement colorés (blanchâtres) associés à ces traces traduisent les transformations chimiques présentes dans le micro-environnement autour des racines vivantes : champignons, micro-organismes, eau du sol (Retallack, 2008). Les nombreuses pontes fossilisées de dinosauriens trouvées dans ces limons de débordement, sont pour leur grande majorité préservées dans l'horizon d'accumulation calcique Bc (photo 3). Il est fréquent de trouver plusieurs niveaux des pontes à l'intérieur de l'horizon Bc d'un même paléosol, ce qui suggère des apports successifs de limons de débordement et une fidélité des animaux à certains sites. La relation entre les œufs de dinosauriens et les nodules carbonatés montre que les œufs ont été pondus avant le développement des nodules carbonatés.



Photo 3 : Coupe verticale d'un œuf de dinosauriens dégagée par l'érosion. L'intérieur de la coquille, remplie par des limons de crue, montre quelques débris de coquille accumulés sur le fond ainsi que des nodules carbonatés qui se sont développés lors de la pédogenèse qui a suivi le remplissage des œufs par des dépôts de crue. Echelle de la photo = 15 cm.



Photo 4 : Faciès palustres montrant un débit prismatique caractéristique. Ce débit correspond aux anciennes traces des racines des plantes qui traversaient le substrat pour atteindre la nappe phréatique.

En bordure des lacs et mares, les sols se développent suivant les mêmes processus sur des boues très riches en carbonate de calcium, donnant naissance aux calcaires palustres (Freytet et Plaziat, 1982 ; photo 4). Dans les zones littorales des lacs, la production en carbonate est favorisée par les températures élevées, la bio-précipitation par les algues et les organismes à test calcaire dont les plus courants sont les mollusques et les ostracodes et parmi les plantes, les charophytes (Klappa, 1980 ; Wright et Robinson, 1988).

Ces observations macroscopiques nous montrent que les paysages étaient relativement stables sur des périodes de l'ordre de quelques milliers à dizaines de milliers d'années pour permettre le développement des transformations minéralogiques associées à la pédogenèse. Les dépôts de crue réguliers contribuaient à l'alimentation de la plaine alluviale.

## 4. LES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES

La description macroscopique des calcrètes permet d'apprécier leur degré d'évolution à partir de la densité des nodules calcaires. L'étude des transformations minéralogiques associées fournit des informations précieuses sur les conditions climatiques régnant lors de la formation des sols.

Les calcisols caractérisés par cet horizon riche en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , se forment sous des climats chauds présentant une alternance de périodes sèches et humides qui favorisent la migration/précipitation des carbonates dans les sols, ainsi que la formation des minéraux argileux **authigènes\*** tels que la **smectite\*** et la **palygorskite\*** au détriment des minéraux détritiques que sont l'**illite\*** et l'**illite-smectite**.

Sur plusieurs niveaux, les limons de débordement sont les faciès hôtes d'accumulations de dolomites aux morphologies variées  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , regroupées sous le terme générique de dolocrètes (Nettenberg, 1980). A sa base, le dolocrète est généralement marmorisé avec de rares nodules, irrégulièrement espacés et dont la taille ne dépasse pas le décimètre (figure 5). La quantité de nodules augmente vers le haut, créant ainsi un horizon de coalescence qui passe à un horizon d'abord en nid d'abeille puis massif au sommet du dolocrète.

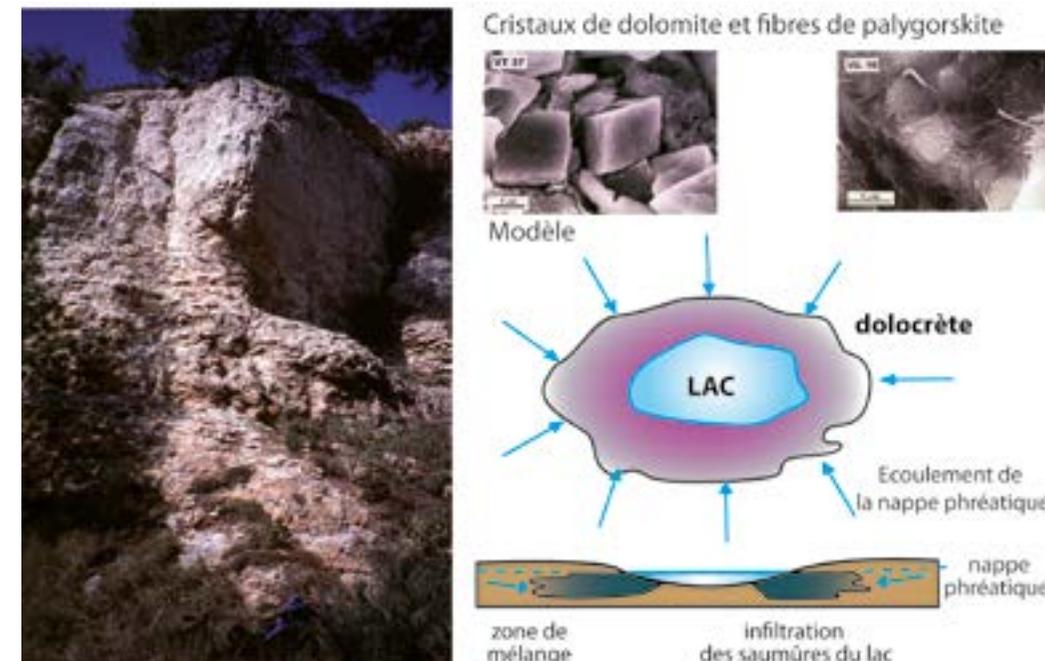


Figure 5 : Un profil de dolocrète (Vitrolles) et le modèle du dolocrète en halo, proposé à partir des observations sur les dolocrètes de Provence (d'après Colson et Cojan, 1996).

Les dolocrètes de Provence se sont développés autour d'étendues d'eau de taille sans commune mesure avec celle de la zone de recharge (Colson et Cojan, 1996). Leur présence, à proximité d'un lac permanent ou d'étangs temporaires, suggère que le mécanisme de formation des dolocrètes a été lié en particulier au mélange des eaux souterraines régionales avec les saumures lacustres qui infiltraient la zone phréatique pendant les périodes de forte évaporation du fait de leur densité. La zone de mélange des eaux formait des auréoles autour des lacs et mares conduisant alors au développement de dolocrètes en halo autour de ces masses d'eau.

Les dolocrètes constituent un enregistrement privilégié d'épisodes semi-arides qui sont ainsi identifiés à partir de discontinuités sédimentaires et d'associations minéralogiques particulières (par exemple : dolomite et palygorskite, minéral argileux authigène). Quelques paléosols présentent des caractéristiques fort différentes. Développés sur les limons de la plaine d'inondation, ce sont des paléosols organisés en séquences se distinguant par la rareté de nodules carbonatés, la présence de nodules de fer et des couleurs de marmorisation dans les couleurs bleu-mauve (photo 4). L'ensemble de ces caractéristiques nous a conduit à les interpréter comme des **pseudogley\***, qui traduisent des périodes au cours desquelles la nappe phréatique restait haute et ne subissait que de faibles fluctuations limitant ainsi les transformations minéralogiques.



Photo 4 : Pseudogley, sols développés sous des conditions relativement stables avec une évaporation limitée (site des Bréguières à Puylobier).

Cinq épisodes semi-arides et un épisode plus humide ont ainsi été identifiés à partir des caractéristiques morphologiques ou minéralogiques des paléosols observés sur l'ensemble du bassin (Cojan et Moreau, 2006). Les épisodes semi-arides constituent des repères très précieux dans ces séries dont les variations latérales de faciès sont rapides, sur quelques centaines de mètres. Ils permettent également de proposer des restitutions des paléotopographies.

Le climat moyen qui régnait en Provence à la fin du Crétacé - début du Paléogène a permis le développement de nombreux paléosols, comparables aux calcisols modernes. De tels sols nécessitent un climat suffisamment chaud et l'alternance de saisons sèches et pluvieuses pour faciliter les réactions chimiques. Les précipitations annuelles moyennes peuvent être estimées entre 400 et 700 mm par an. Les épisodes semi-arides, si l'on s'appuie sur les travaux menés en Australie, impliquent des précipitations annuelles moyennes de 110-280 mm réparties sur quelques événements intenses, un potentiel d'évaporation de 2 000 à 3 000 mm (Mann et Horwitz, 1979 ; Carlisle, 1983 ; Arackel, 1986). Au cours de l'épisode plus humide, les conditions climatiques étaient plus régulières, avec un potentiel d'évaporation et un contraste saisonnier nettement moindres limitant les oscillations de la nappe phréatique.

## 5. RESTITUTION PALÉOÉCOLOGIQUE

Les différentes démarches s'appuyant sur l'étude des paléosols ont permis d'accéder aux paramètres caractéristiques du climat qui régnait en Provence à cette époque et de mettre en évidence des fluctuations climatiques de haute fréquence et de forte amplitude. Les reconstructions de la paléovégétation s'appuient sur des analyses géochimiques des coquilles extraites de pontes fossilisées de dinosauriens qui sont nombreuses dans les limons de débordement, ainsi que des nodules carbonatés des paléosols. Cette approche croisée permet de proposer des éléments de reconstitution paléoécologique, à partir de l'hydrologie, du couvert végétal et des indices de sédentarité des dinosauriens à travers leurs pontes.

La majorité des coquilles d'œufs est attribuée à des dinosauriens bien que l'on n'ait jamais retrouvé d'embryon dans les œufs (Dughi et Sirugue, 1957 ; Williams *et al.*, 1984 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2001). Toutefois, d'après les restes fossiles, la faune de dinosauriens comprenait des théropodes, sauropodes, ornithopodes ainsi que des tortues et crocodiles (Buffetaut et Le Loeuff, 1991 ; Tortosa, 2014 ; Tortosa *et al.*, 2014 ; chapitre 6). En l'absence d'attribution directe d'un type d'œuf à une espèce ou un genre de dinosauriens, plusieurs essais de classification des coquilles d'œufs en fonction de leurs micro-, macro- structures et de leurs caractères morphologiques, ont été proposés (Vianey-Liaud *et al.*, 1994 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2001; chapitre 5).

La majorité des pontes se trouve dans les limons de débordement, les autres sont situées dans les sédiments correspondant aux anciennes rives des lacs. Les pontes retrouvées dans les limons de débordement sont presque systématiquement associées à l'horizon calcique Bc des paléosols. La présence de nodules carbonatés à l'intérieur de certains œufs montre que les œufs étaient pondus dans des sédiments non consolidés, avant la pédogenèse, probablement après une période de crue de débordement. L'excellente préservation des coquilles d'œufs est attribuée à l'environnement riche en carbonate de calcium que constitue l'horizon calcique Bc des paléosols (Cojan *et al.*, 2003).

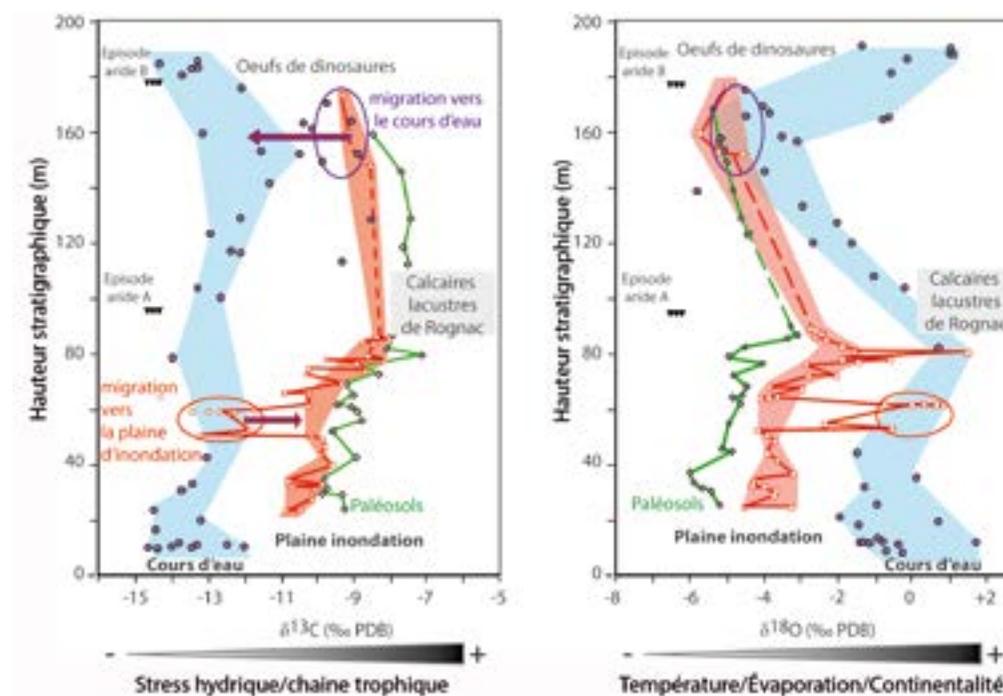


Figure 6 : Restitution de la végétation, des eaux de boisson et de la sédentarité des femelles lors des périodes de pontes à partir des données isotopiques des paléosols et des coquilles d'œufs fossilisées de dinosauriens (d'après Cojan *et al.*, 2003).

L'analyse géochimique (isotopes stables du carbone et de l'oxygène) des coquilles d'œufs et des nodules des paléosols donne accès à la nature des eaux de boisson et à l'alimentation des animaux qui ont pondu les œufs. L'oxygène fixé par le carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) de la coquille provient de l'eau ingérée par l'animal (Folinsbee *et al.*, 1970 ; De Niro et Epstein, 1978). La variabilité dans les mesures isotopiques sur les coquilles d'œufs est généralement attribuée à la variabilité naturelle des eaux de boisson.

La comparaison des résultats entre deux coupes situées l'une au pied des paléoreliefs septentrionaux dans la plaine d'inondation (secteur de Roques-Hautes) et l'autre en bordure du lit du cours d'eau principal (secteur de Rousset) (figure 2) montre des données relativement homogènes sur chaque site, et fort distinctes entre sites (figure 6).

Dans ces séries quasiment dépourvues de macro et micro restes de végétaux, l'analyse des isotopes stables du carbone constitue un outil précieux pour évaluer la composition de la biomasse. La composition isotopique du carbone des nodules carbonatés des sols est directement reliée à la biomasse (au Crétacé seules des **plantes en  $\text{C}_3$** \* sont connues) et au taux de respiration du sol. Par contre, la valeur des isotopes du carbone des coquilles reflète le régime alimentaire des animaux, les variations interspécifiques sont généralement mineures comparées à celles liées à l'environnement (Erben *et al.*, 1979 ; Schaffner et Swart, 1991 ; Folinsbee *et al.*, 1970 ; Sarkar *et al.*, 1991).

Les données des deux sites présentent des valeurs contrastées, indiquant des alimentations différentes entre les deux sites. En bordure du cours d'eau, les animaux se nourrissaient de plantes poussant dans des zones humides (valeurs isotopiques les plus négatives) alors que dans la plaine d'inondation, ils consommaient des végétaux adaptés à des substrats plus secs. Les faibles dispersions des valeurs sur chaque coupe sont difficiles à interpréter car elles peuvent être attribuées à des effets intraspécifiques ou à des régimes alimentaires différents (carnivores ou herbivores).

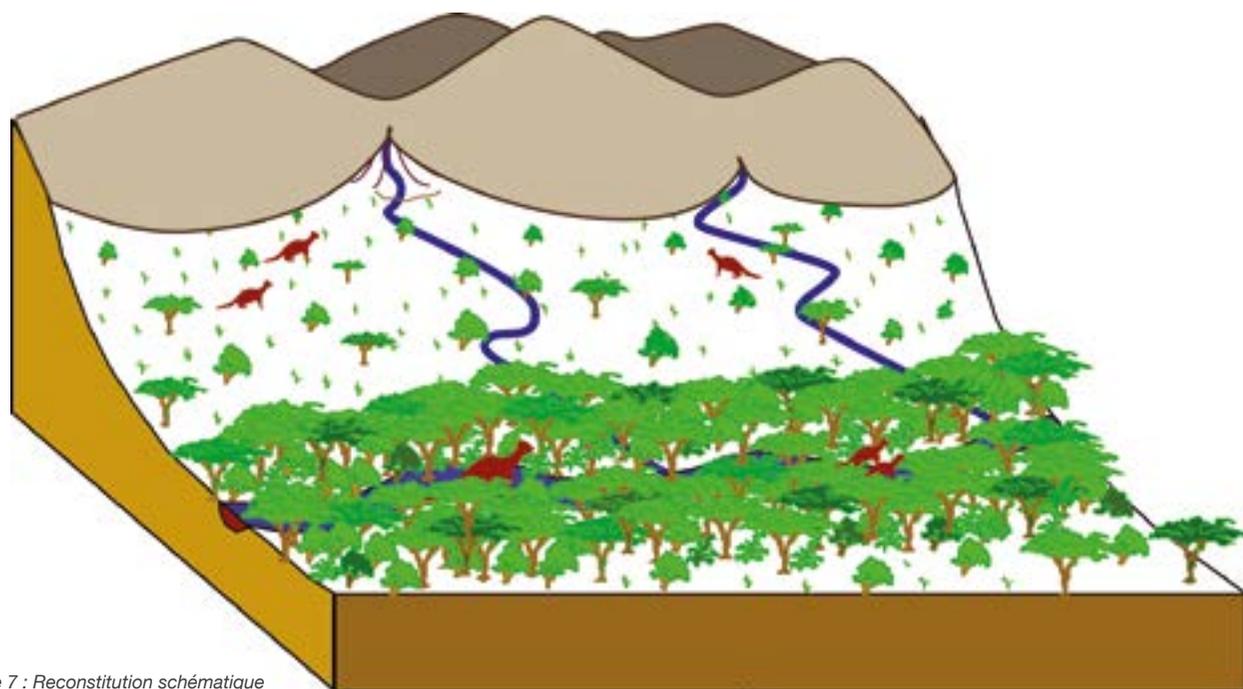


Figure 7 : Reconstitution schématique du paysage du Bassin de l'Arc au Crétacé terminal (d'après Cojan *et al.*, 2003).

Les données des isotopes stables de l'oxygène des coquilles d'œufs de dinosauriens sont également très contrastées entre les deux sites, mettant en évidence des eaux de boissons aux caractéristiques distinctes. En bordure du cours d'eau, les animaux buvaient une eau dont la composition reflète des sources diverses, avec une partie du bassin versant drainant le massif **métamorphique\*** des Maures et l'autre les formations carbonatées et évaporitiques d'âge triasique de la bordure nord du bassin. Dans la plaine d'inondation, les eaux de boisson possèdent une composition très proche de celle des précipitations comme l'indique le faible écart entre les données des coquilles d'œufs et celles de nodules pédogéniques. Les bassins versants de ces affluents étaient très limités par la présence des reliefs sur la bordure nord du bassin. La diminution de l'écart entre les valeurs des coquilles d'œufs et des nodules des paléosols, est interprétée comme une réduction du potentiel d'évaporation entre le Campanien et le Maastrichtien moyen. Ce résultat est tout à fait en accord avec l'évolution des paléosols carbonatés dont les horizons d'accumulation Bc diminuent en épaisseur ainsi que la densité de nodules tout au long de la coupe.

Les résultats des analyses des isotopes stables, nous montrent des animaux relativement sédentaires lors des périodes de pontes. Ceux-ci consommaient l'eau des cours d'eau et la végétation environnante. Une végétation adaptée à un léger stress hydrique dans la plaine d'inondation alors que le cours d'eau principal était probablement bordé d'une ripisylve prélevant l'eau du cours d'eau pendant la saison humide et celle de la nappe phréatique pendant la saison sèche (figure 7).

Les animaux actuels pondent leurs œufs à la fin de la saison des pluies lorsque les périodes de sécheresse deviennent plus longues, évitant ainsi les risques de dommage des lieux de ponte par les crues. Sur les coupes étudiées, les femelles dinosauriennes pondaient leurs œufs sur des sites qu'elles occupaient un certain temps et les déplacements entre plaine d'inondation et ripisylve étaient très limités durant la période de nidification et de ponte. En effet, les études sur les oiseaux actuels ont montré qu'il faut environ deux semaines pour éliminer la signature isotopique d'une eau de boisson précédemment consommée (Folinsbee *et al.*, 1970).

Cependant, dans chaque coupe, on observe des pontes dont les valeurs isotopiques (carbone et oxygène) sont bien trop à l'écart des valeurs moyennes pour être attribuées à une variation intraspécifique. Ces valeurs correspondent d'ailleurs à celles de l'autre site. Ceci laisse penser que certaines femelles se déplaçaient de quelques kilomètres peu de temps avant la période de la ponte entre la plaine alluviale et le cours d'eau.

## 6. CONCLUSION

Les différents résultats obtenus dans cette étude des paléosols du Crétacé terminal du bassin de l'Arc montrent le grand intérêt des approches multidisciplinaires intégrant la sédimentologie, la minéralogie et la géochimie. L'étude d'objets géologiques variés et l'utilisation de méthodes spécifiques apportent des informations complémentaires pour la reconstitution des paramètres paléohydrologiques, paléoclimatiques et paléoécologiques.

Ces approches multidisciplinaires nous ont permis d'identifier un climat de type subtropical pour le Crétacé terminal (Campanien supérieur et Maastrichtien), entrecoupé de quelques épisodes semi-arides et d'un épisode plus humide. Dans ce contexte paléoclimatique, le couvert végétal se différenciait nettement d'un habitat à l'autre. Le cours d'eau principal était bordé d'une ripisylve alors qu'une végétation plus ouverte adaptée à des conditions plus sèches caractérisait la plaine d'inondation. Les femelles de dinosauriens étaient fidèles à leur site de nidification comme l'indiquent le nombre et la succession de nids dans les horizons fossilifères des sites étudiés. De plus, elles se déplaçaient peu hors du site de nidification pendant la période précédant la ponte.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arakel A. V. (1986). Evolution of calcrete in palaeodrainages of the lake Napper Area, central Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 54 : 283-303.
- Babinot J.-F. et Durand J.-P. (1980a). Les étages français et leurs stratotypes (Valdonnien, Fuvélien, Bégudien, Rognacien, Vitrollien). *Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 109 : 92-171.
- Babinot J.-F. et Durand J.-P. (1980b). Les étages français et leurs stratotypes (Rognacien, Vitrollien). *Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 109 : 184-192.
- Brewer R. (1976). *Fabric and mineral analysis of soils*, 2<sup>e</sup> édition, Krieger, New York, 482p.
- Buffetaut E. et Le Loeuff J. (1991). Late Cretaceous dinosaur faunas of Europe: some correlation problems. *Cretaceous Research* 12 : 159-176.
- Carlisle D. (1983). Concentration of uranium and vanadium in calcretes and gypcrettes. In : *Residual Deposits*, Wilson R. C. L. (Ed.). Geological Society of London, special publications 11 : 185-195.
- Cojan I. (1993). Alternating fluvial and lacustrine sedimentation: tectonic and climatic controls, Provence basin, S. France, Upper Cretaceous/Paleocene. *International Association of Sedimentologists*, special publication 17 : 425-438.
- Cojan I. et Moreau M.-G. (2006). Correlation of terrestrial climatic fluctuations with global signals during the Upper Cretaceous-Danian in a compressive setting. *Journal of Sedimentary Research* 76 : 589-604.
- Cojan I., Moreau M.-G. et Stott L. E. (2000). Stable carbon isotope stratigraphy of the Paleogene pedogenic series of southern France as a basis for continental marine correlation. *Geology* 28 (3) : 259-262.
- Cojan I., Renard M. et Emmanuel L. (2003). Palaeoenvironmental reconstruction of dinosaur nesting sites based on a geochemical approach of eggshells and associated palaeosols, Maastrichtian, Provence Basin, France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 191 : 111-138.
- Colson J. et Cojan I. (1996). Groundwater dolocretes in a lake marginal environment: an alternative model for dolomite formation in continental settings (Danian of the Provence basin, France). *Sedimentology* 43 : 175-188.
- De Niro M. J. et Epstein S. (1978). Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42 (5) : 495-506.
- Dughi R. et Sirugue F. (1957). Les œufs de dinosauriens du Bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 245 : 707-710.
- Durand J.-P. et Guieu G. (1980). Cadre structural du bassin de l'Arc. Le gisement de charbon du bassin de l'Arc (Houillères de Provence). *Industrie minière, supplément* 62 : 3-12.
- Erben H. K., Hoeff J., Wedepohl K. H. (1979). Paleobiological and isotopic studies of eggshells from declining dinosaur species. *Paleobiology* 5 (4) : 380-414.
- Folinsbee R. E., Fritz P., Krouze H. R., Roblee A. R. (1970). Carbon-13 and oxygen-18 in dinosaur, crocodile, and bird eggshells indicate environmental conditions. *Science* 168 : 1353-1356.
- Freytet P. et Plaziat J.-C. (1982). Continental Carbonate Sedimentation and Pedogenesis. In : *Late Cretaceous and Early Tertiary of Southern France*, Purser B. H. (Ed.). Contribution to Sedimentology 12, 213 p.
- Garcia G. et Vianey-Liaud M. (2001). Dinosaur eggshells as biochronological markers in Upper Cretaceous continental deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 169 : 153-164.
- Klappa C. F. (1980). Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. *Sedimentology* 27 : 613-629.
- Mann A. W. et Horowitz R. C. (1979). Groundwater calcrete deposits in Australia: Some observations from Western Australia. *Journal Geological Society Australia* 26 : 293-303.
- Netterberg F. (1980). Geology of Southern African calcretes: 1. Terminology, description, macrofeatures, and classification. *Transactions Geological Society South Africa* 83 : 255-283.
- Retallack G. J. (2008). *Soils of the Past: an introduction to paleopedology*, 2<sup>e</sup> édition, John Wiley and Sons, 520 p.
- Sarkar A., Bhattacharya S. K., Mohabey D. M. (1991). Stable isotope analyses of dinosaur eggshells: palaeoenvironmental implications. *Geology* 19 : 1068-1071.
- Schaffner F. C. et Swart P. K. (1991). Influence of diet and environmental water on the carbon and oxygen isotopic signatures of seabird eggshell carbonate. *Bulletin Marine Science* 48 : 23-38.
- Tortosa T. (2014). *Vertébrés continentaux du Crétacé supérieur de Provence (Sud-Est de la France)*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, 582 p.
- Tortosa T., Buffetaut E., Vialle N., Dutour Y., Turini E. et Cheylan G. (2014). A new abelisaurid dinosaur from the Late Cretaceous of southern France: Palaeobiogeographical implications. *Annales de paléontologie* 100 (1) : 63-86.
- Vianey-Liaud M., Mallan P., Buscail O. et Montgelard C. (1994). Review of French dinosaur eggshells: morphology, structure, mineral and organic composition. In : *Dinosaur eggs and babies*, Carpenter K., Hirsch K. et Horner J. R. (Eds), Cambridge University Press, 1551-1583.
- Westphal M. et Durand J.-P. (1990). Magnétostratigraphie des séries continentales fluvio-lacustres du Crétacé supérieur dans le synclinal de l'Arc, région d'Aix-en-Provence France, *Bulletin de la Société Géologique de France* 8 : 609-621.
- Williams D. L. G., Seymour R. S. et Kerourio P. (1984). Structure of fossil dinosaur eggshells from the Aix Basin, France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 45 : 23-37.
- Wright V. P. et Robinson D. (1988). Early carboniferous floodplain deposits from South Wales: a case study of the controls on paleosol development. *Journal of the Geological Society of London*, 145 : 847-857.



## GILLES CHEYLAN

*Conservateur en chef honoraire  
du Muséum d'Histoire Naturelle  
d'Aix-en-Provence, France.*

### Mots-clés :

Paléontologie,  
Collections,  
Pontes et oeufs de dinosauiens,  
Muséum d'Histoire Naturelle  
d'Aix-en-Provence,  
Crétacé supérieur,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

*Article reçu le 8 septembre 2019,  
Article accepté le 25 mai 2020*

# L'APPORT DES RECHERCHES DU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE D'AIX-EN-PROVENCE À LA CONNAISSANCE DE LA REPRODUCTION DES DINOSAURIENS DE PROVENCE

## GILLES CHEYLAN

### Résumé :

Les connaissances sur les œufs de dinosauiens en Provence sont intimement liées au Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence. Dès son origine, le muséum se développe autour de la géologie et de la paléontologie, à travers les recherches et dons d'illustres savants comme Coquand, Rostan d'Abancourt ou de Saporta. Mais c'est sous l'impulsion des conservateurs Dughi et Sirugue que les œufs de dinosauiens devinrent le sujet de prédilection du muséum aixois. Cet article retrace l'histoire des premières découvertes et études sur les œufs de dinosauiens, notamment sur le secteur de Roques-Hautes entre 1950 et 1980. Les travaux des conservateurs du muséum ont permis des avancées notables et des hypothèses sur la diversité des œufs, sur leur répartition dans le temps et dans l'espace, ainsi que sur la disparition des dinosauiens. Ces recherches permirent une importante prise de conscience sur l'intérêt de protéger le géopatrimoine local, prémices de la création de la future réserve naturelle.

### Abstract :

Knowledge of dinosaur eggs in Provence is intimately linked to the Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence. Since its creation, the museum has developed around geology and paleontology, through the research and donations of illustrious scholars such as Coquand, Rostan d'Abancourt and de Saporta. It was under the directorship of the curators Dughi and Sirugue that dinosaur eggs became the main research topic of the museum. This article traces the history of the first discoveries and studies on dinosaur eggs, especially in the Roques-Hautes area, between the 1950s and 1980s. The museum curators' work has led to significant advances and assumptions about egg diversity, their distribution over time and space, and about the dinosaurs' extinction. This research has led to an important awareness on the importance of protecting the local geo-inheritance: the beginnings of the creation of the future natural reserve.

## 1. INTRODUCTION

Suite à la publication du texte fondateur de l'étude des reptiles fossiles de Provence par Philippe Matheron (1869), peu de recherches avaient été entreprises sur ces vertébrés durant près de quatre-vingts ans. Il faut attendre la publication du travail de Lapparent (1947) pour voir à nouveau une synthèse publiée sur le **phylum\*** le plus médiatique de ces vertébrés fossiles : les dinosauriens.

Interrompues par la seconde guerre mondiale, et malgré quelques découvertes passées inaperçues, les recherches vont reprendre dans les années 1950 avec la mise au jour d'importants gisements dans le Bassin d'Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône et Var). Pourtant, on connaissait dès la fin du 19<sup>e</sup> siècle les affleurements du Crétacé supérieur, mal datés, des fameux « grès à reptiles » de la haute vallée de l'Arc près des villages de Châteauneuf-le-Rouge et de Trets (Gervais, 1873 ; Collot, 1880, 1890) et deux œufs partiels avaient été signalés près du village de Rognac (Matheron, 1869).

Ces découvertes avaient été révisées par de Lapparent (loc. cit.) dans un travail descriptif peu contesté durant 40 ans, et qui établira la taxinomie des espèces de dinosauriens recensées dans les niveaux Maastrichtien de Provence : deux espèces de **titanosauriens\*** : *Hypselosaurus priscus* et *Titanosaurus indicus*, une espèce de grand **théropode\*** : *Megalosaurus pannoniensis*, deux genres d'**ornithopodes\*** : *Rhabdodon priscus* et *Orthomerus transylvanicus*, et un **nodosauridé\*** : *Struthiosaurus lugdunensis*.

La confirmation de l'appartenance à des dinosauriens des œufs fossiles trouvés associés à ces restes osseux (Van Straelen et Denaeyer, 1923) restera assez confidentielle, les œufs fossiles apparaissant alors comme un matériau d'étude de faible valeur taxinomique.

Pourtant, les découvertes du désert de Gobi menées par une équipe du Muséum d'Histoire Naturelle de New-York en 1922-1923, associant œufs, ossements de juvéniles et d'adultes de *Protoceratops andrewsi* (qui s'est révélé plus tard ne pas être l'espèce ayant pondu ces œufs) avaient reçu un large écho dans la presse car pour la première fois, une découverte permettait de lever un voile sur un des traits de la biologie de ces espèces les plus mal connus : leur reproduction.

Curieusement, l'intérêt médiatique que suscita cette découverte aux Etats-Unis n'eut pas de répercussion sur les découvertes françaises réalisées 50 ans plus tôt, et il fallut attendre les années 1960 et la publication de la note de Lapparent (1957) pour que l'intérêt porté aux œufs fossiles trouvés dans la haute vallée de l'Arc se réveille et suscite de nombreuses recherches dans le sillage des publications de Raymond Dughi et François Sirugue du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence.

Sans doute pour la même raison, la mention du site de Roques-Hautes (Beaurecueil) par de Lapparent en 1947 passa complètement inaperçue, et l'intérêt de ce gisement majeur ne sera réellement reconnu que dans les années 1960.

## 2. LES PREMIÈRES COLLECTIONS PALÉONTOLOGIQUES DU MUSÉUM D'AIX-EN-PROVENCE

Porté par la vague de création de musées qui caractérise la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, Henri Coquand (photo 1) propose en 1838 à la ville d'Aix-en-Provence, de créer un muséum d'histoire naturelle qui permettrait d'abriter ses collections et d'y donner un cours de géologie et de géométrie appliquée aux arts. La ville accède à sa demande, et le 4 mai 1839, le nouveau Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (MHNA) est inauguré (Sepulveda et Dutour, 2006).

Dès son origine, l'histoire des collections du MHNA est donc marquée par un intérêt prononcé pour la géologie et la paléontologie. Henri Coquand soutient sa thèse à Paris sur *Les modifications des calcaires en présence des roches ignées et sur les Aptychus* avant d'aller enseigner la géologie dans les facultés de Besançon, Marseille, puis Dijon (Sepulveda et Dutour, 2006).



Photo 1 : Henri Jean Baptiste Coquand (Archives du MHNA)

Coquand ayant quitté la ville d'Aix-en-Provence dès 1844 pour s'installer au Maroc, son œuvre est poursuivie par plusieurs donateurs au premier rang desquels se trouve Louise Rostan d'Abancourt (photo 2). Fille de Léon Rostan, célèbre médecin à la faculté des sciences de Paris, elle poursuit à Aix-en-Provence, où elle s'est installée en 1875, l'enrichissement de sa collection de mollusques actuels et fossiles et de préhistoire, commencée dans le nord de la France.



Photo 2 : Louise Rostan d'Abancourt, photographie extraite de sa biographie publiée en 1913 (Archives du MHNA).

Rassemblant près de 40 000 spécimens, cette collection est donnée à la ville d'Aix contre la promesse de l'ouverture d'un nouveau muséum, plus grand, promesse qui se réalisera en 1905, deux ans après la mort de Louise Rostan.

Une boîte de coquilles d'œufs de dinosauriens appartenant à cette donatrice fait entrer les premiers fossiles de dinosauriens dans les collections du MHNA (Dughi et Sirugue, 1958a). Cette boîte n'ayant pas d'origine précise, il est probable que ces coquilles aient été données par Matheron, qui en avait également confiées à Gervais pour étude (Gervais, 1877).

Une deuxième boîte contenait des coquilles collectées à Velaux (Bouches-du-Rhône) par Dérognat (Dughi et Sirugue, 1958a) qui y avait trouvé en 1923 des coquilles d'œufs « à profusion » (Dérognat, 1935), coquilles qui furent attribuées à des oiseaux ou des dinosauriens ornithopodes par Van Straelen et Denaeyer (1923). Malheureusement, ces deux boîtes n'ont pas été retrouvées lors du récolement décennal des collections (Turini, com. pers.).

Contemporain de Louise Rostan, Gaston de Saporta (photo 3) est l'un des « savants » les plus influents de la ville au cours de la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle, et l'un des paléontologues les plus connus de son époque (Bailly, 1992).

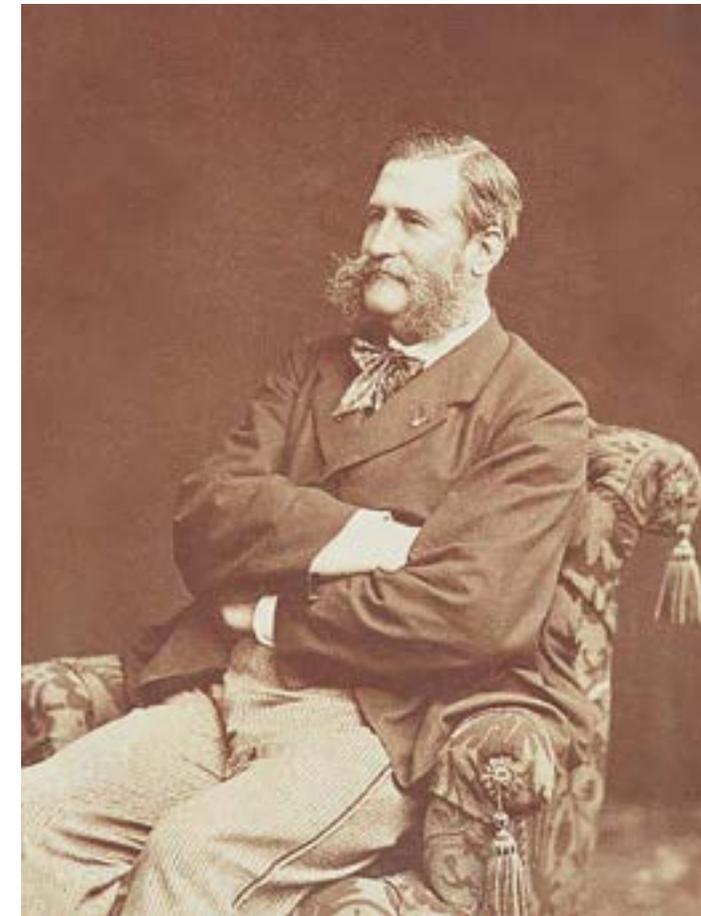


Photo 3 : Gaston de Saporta (Archives du MHNA).

Issu d'une famille aisée, il se lance en 1850, suite au décès de sa jeune épouse, dans l'étude des plantes fossiles de l'Oligocène des gypses d'Aix, travail qu'il poursuivra toute sa vie, en élargissant ses recherches dans de nombreuses localités d'Europe et dans tous les étages géologiques (de Saporta, 1871, 1872a-b, 1889). Il publie beaucoup, décrit de nombreuses espèces nouvelles de végétaux et partage ses importantes collections entre le MHNA, le Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris et l'Université de Montpellier, entre autres.

Gaston de Saporta confie pour étude un ossement de dinosaurien provenant de la haute vallée de l'Arc à P. Gervais : une vertèbre d'« *Hypselosaurus priscus* » (titanosaurien) trouvée à la Grande Pugère sur la commune de Trets (Bouches-du-Rhône), et non pas à Pourrières (Var) (Gervais, 1873). Postérieurement, d'autres ossements d'« *Hypselosaurus* » furent signalés dans le même secteur : Collot (1880) indique que Matheron examina des ossements trouvés à Châteauneuf-le-Rouge et lui-même en trouva près des berges de l'Arc au nord de la commune de Trets (Collot, 1890).

Dès les années 1870-1890, des œufs et ossements de dinosauriens furent donc signalés dans les « marnes et grès bigarrés à reptiles » du Rognacien de la haute vallée de l'Arc.

L'accroissement des collections de paléontologie du MHNA périclita dès le début du 20<sup>e</sup> siècle, comme pour les autres collections d'ailleurs (Sepulveda et Dutour, 2006). L'activité du muséum décroît après la première guerre mondiale et en 1936, l'établissement est fermé par décision de la municipalité qui vend les locaux où il était installé.

Dans les années 1960, le MHNA possède dans ses collections quelques os de dinosauriens : des vertèbres, un humérus presque complet, une extrémité de fémur et des fragments de ceinture pelvienne provenant des environs de Trets et datant du Bégudien (Dughi et Sirugue, 1960). En revanche, en 1994, Cousin *et al.* signalent huit œufs (entiers ou incomplets) + deux « pontes » de deux œufs chacune, dans les collections.

À partir de cette année-là, souvent en collaboration avec l'Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier II, puis avec la Direction de l'Environnement du Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône, le MHNA a réalisé plus de cinquante chantiers de fouilles, dans des niveaux d'âge Campano-Maastrichtien des Bouches-du-Rhône et du Var, augmentant ainsi très significativement le contenu de ses collections paléontologiques.

### 3. LES PREMIÈRES DÉCOUVERTES D'ŒUFS FOSSILES DANS LA HAUTE VALLÉE DE L'ARC

En 1930, Pierre Chamoux, agriculteur à Rousset (Bouches-du-Rhône), avait extrait lors du labour d'une vigne un œuf fossile qui fut déposé dans les collections du laboratoire de géologie de la Faculté des Sciences de Marseille (de Lapparent, 1957). Le fossile fut examiné par de Lapparent à l'occasion de ses séjours en Provence au cours desquels il découvre le site de Roques-Hautes (commune de Beaurecueil), qui est mentionné sans plus de détail dans son travail (de Lapparent, 1947). La découverte de Rousset resta ignorée jusqu'à ce que deux nouveaux fossiles soient mis au jour dans cette localité en 1951 et déposés dans les collections du Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille (Frigara, 1956).

Alerté par cette nouvelle trouvaille, de Lapparent prospecte la localité en 1957 et découvre « 50 œufs entiers dans la série rutilante et un nombre égal dans les marnes grises du Rognacien sous-jacent, sans parler des innombrables fragments de coquilles dispersés un peu partout » (de Lapparent, 1957).

C'est dans les années 1950 que les gisements de la haute vallée de l'Arc commencent donc à susciter un intérêt croissant auprès de la communauté scientifique et des géologues amateurs (Frigara, 1956 ; Germain, 1958 ; Biro, 1958), bien que leur découverte effective ait été réalisée quatre-vingts ans auparavant.

Le 17 avril 1953, le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence réouvre ses portes grâce aux efforts de Raymond Dughi, conservateur bénévole des collections depuis 1948 et qui s'était ému de longue date de la situation précaire des collections auprès de la municipalité (photo 4 ; Sepulveda et Dutour, 2006). Professeur à l'Ecole Normale d'Aix et spécialiste des lichens, Dughi a publié une cinquantaine d'articles sur ces cryptogames quand il prend la direction du nouvel établissement. Quand les gisements de la Haute Vallée de l'Arc commencent à retenir l'attention d'un public de plus en plus large, il est probable que Raymond Dughi ait senti l'opportunité qui se présentait à lui pour accroître la renommée de son établissement qui venait de rouvrir (photo 5). Bien que non géologue, il va très rapidement, avec l'aide de son assistant François Sirugue, du technicien du muséum, M. Laurent et de plusieurs collègues (Billerey, Biro, Ducos, Galito, Touraine et Vincent), prospecter le Bassin d'Aix-en-Provence et y découvrir de nombreux gisements en plus des deux déjà connus : Rousset et Roques-Hautes (Dughi et Sirugue, 1958a).



Photo 4 : Raymond Dughi dans la salle principale du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence vers 1960 (Archives du MHNA).



Photo 5 : Coupure de journal annonçant une émission télévisée avec pour thème les dinosaures de Sainte-Victoire (Le Provençal, 18/09/70 - Archives du MHNA).

Au cours de plus d'une centaine de déplacements sur le terrain, commencés dès la fin de l'année 1950, Dughi et Sirugue vont étudier : « un grand nombre de points des auréoles que le Bégudo-Rognacien et le Vitrollien dessinent dans le bassin fluvio-lacustre d'Aix » (Dughi et Sirugue, 1958a).

Le début des années 1950 marque donc le renouveau du MHNA et la mise au jour d'importants gisements à dinosauriens dans un chapelet de localités s'étalant d'ouest en est dans la haute vallée de l'Arc sur les communes de Meyreuil, Beaucueil, Châteauneuf-le-Rouge, Rousset, Puyloubier, Trets et Pourrières, hissant ces sites en un haut-lieu de la paléontologie (photo 5).



Photo 6 : Coupure de journal faisant le récit d'un œuf de dinosaure de Roques-Hautes intégrant les prestigieuses collections de l'Université de Harvard et étudié par l'éminent paléontologue A. Romer (La Marseillaise, 13/11/57 - Archives du MHNA).



Photo 7 : Excursion paléontologique à Roques-Hautes le 14 juillet 1959 avec, de gauche à droite : François Ducos, Paul Jodot et Raymond Dughi (Archives du MHNA).

Au cours de la décennie qui va suivre la découverte de ces nombreux gisements, Dughi et Sirugue vont publier plusieurs articles faisant le point sur leurs recherches (Dughi et Sirugue, 1957a-b, 1958a-c, 1960, 1966, 1976 ; Billerey *et al.*, 1959 ; Dughi *et al.*, 1959), suscitant dans leur sillage un intérêt national et international pour les œufs de dinosauriens du Bassin d'Aix-en-Provence (photos 6 à 10 ; Voss-Foucard, 1968 ; Erben *et al.*, 1979 ; Ginsburg, 1980 ; Kérourio, 1981a-b ; Williams *et al.*, 1984 ; Penner, 1985 ; Cousin *et al.*, 1987).



Photos 8, 9 et 10 : Excursions paléontologiques sur Roques-Hautes vers 1960 par des chercheurs de l'Université de Fribourg (Allemagne) guidés par R. Dughi (Archives du MHNA).



Photo 11 : Excursion paléontologique sur Roques-Hautes vers 1960 par des chercheurs de l'Université d'Heidelberg (Allemagne) guidés par R. Dughi (Archives du MHNA).

Dès les premières découvertes, les recherches vont s'orienter vers quatre axes (de Lapparent, 1957, Dughi et Sirugue, *loc. cit.*) :

- la position stratigraphique des gisements et la limite supérieure du Rognacien ;
- la diversité des coquilles ;
- la répartition spatiale des œufs et des pontes ;
- les coquilles « pathologiques » et l'extinction des dinosauriens.

## 4. POSITION STRATIGRAPHIQUE DES GISEMENTS ET LA LIMITE SUPÉRIEURE DU ROGNACIEN

Dans sa note de 1957, de Lapparent note quatre niveaux à œufs de dinosauriens répartis de bas en haut du Rognacien, sur une épaisseur de 200 mètres environ, dans des marnes et grès, mais non dans les calcaires lacustres. Le cinquième niveau fossilifère l'a étonné, étant superposé au calcaire de Rognac, limite supérieure autrefois admise du Rognacien. De Lapparent place donc ces œufs dans le Vitrollien inférieur, comportant des grès, des conglomérats calcaires et quartzeux et le poudingue siliceux de la Galante : « *La présence d'œufs de dinosaures dans les niveaux rutilants du Vitrollien apparaît comme un fait nouveau, [étant admis] que le Danien, [dont l'étage local est le Vitrollien], s'arrête, et avec lui le Crétacé, au sommet de la barre supérieure du calcaire de Rognac* ».

L'absence de fossiles de dinosauriens dans les niveaux supra-Crétacé ayant été observée partout dans le monde, de Lapparent en conclut que le Vitrollien inférieur doit être arrêté non pas aux calcaires de Rognac, comme c'était admis alors, mais au sommet de la série rutilante de Vitrolles, le Montien (et par conséquent le Paléocène), commençant avec les calcaires de cette localité.

Cette observation est confirmée par Dughi et Sirugue (1957a), qui observent des œufs fossilisés abondants dans les couches fluvio-lacustres supérieures au calcaire de Rognac, par exemple : « *dans les argiles montiennes du S.O. de Puylobier, de celles du Canet (Meyreuil) et dans la région de Roques-Hautes (Beaurecueil) et les argiles de Riouffé (Saint Antonin)* ».

Ces observations sont précisées dans une seconde note (Dughi et Sirugue, 1957b) dans laquelle les auteurs affirment : « *on doit rattacher au Rognacien la plus grande partie des argiles vitrolliennes inférieures [...] et peut être même la totalité de ces argiles* ». Ces observations sont corroborées par l'étude des terrains de Roques-Hautes, riches en œufs fossilisés situés au-dessus du calcaire de Rognac.

L'étude tectonique des **brèches\*** de Sainte-Victoire confirmera cette opinion en attribuant la barre calcaire de Roques-Hautes (Crête du Marbre et Harmelins) à la formation des Calcaires de Rognac (Durand et Tempier, 1962) et par là-même au report de la limite Crétacé/Paléogène à la base du calcaire de Vitrolles et du Poudingue de la Galante (Billerey *et al.*, 1959 ; Touraine, 1961 ; chapitre 2).

La recherche systématique des coquilles d'œufs de dinosauriens par Dughi et Sirugue dans des horizons stratigraphiques étendus, du Bégudien au Vitrollien a donc permis de fixer de façon définitive, à la fin des années 1950, la limite supérieure du Rognacien, et par là-même, la limite locale du Crétacé, en reportant le Vitrollien à la base du Paléocène (Danien). La barre calcaire de Rousset, qui servit à de Lapparent (1957) à séparer le Rognacien du Vitrollien inférieur, sépare aujourd'hui le Rognacien inférieur du Rognacien supérieur, ex-Vitrollien inférieur (Babinot et Durand, 1980 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2001 ; Cojan et Moreau, 2006).

## 5. DIVERSITÉ DES COQUILLES

Dès la première étude des œufs nouvellement trouvés à Rousset, de Lapparent (1957) observe « deux types bien tranchés » d'épaisseurs : des coquilles épaisses (2 mm) dans les niveaux inférieurs (= Rognacien inférieur) et des coquilles minces (1 mm) dans le niveau supérieur (= Rognacien supérieur). Selon lui, ces œufs ont été pondus par des **sauropodes\*** (« *Hypselosaurus* ») compte tenu de la taille de ces œufs, contestant l'attribution à des ornithopodes (*Rhabdodon*) faite par Van Straelen (1923). Cette assertion ne sera plus guère remise en cause plus tard, malgré l'absence d'embryons permettant d'affirmer l'appartenance spécifique de ces œufs (Dughi et Sirugue, 1958a).

Reprenant ces observations sur un échantillon beaucoup plus large (plus de 10.000 coquilles et plusieurs dizaines d'œufs observés *in situ*, donc sans prélèvement), provenant de diverses localités de la haute vallée de l'Arc, Dughi et Sirugue (1957a) concluent à la présence de cinq types de coquilles dans le Rognacien, plus deux autres types probables représentés par un seul œuf, et un huitième type dans le Bégudien. Ces types d'œufs sont distingués par la couleur et l'épaisseur des coquilles, ainsi que par la dimension des œufs. Trois histogrammes accompagnent cette note, mais les valeurs moyennes ne sont pas données (médiane=2,5 mm pour Rousset, 2,4 + 2,7 mm (courbe bi-modale) pour Roques-Hautes au sud de la barre calcaire et 1,9 mm pour les argiles au nord de la barre calcaire).

Plus tard, Dughi et Sirugue (1958a) reconnaissent neuf types différents de coquilles plus cinq autres possibles, et contestent l'affirmation de Lapparent (1957) selon laquelle les épaisseurs de coquilles vont en s'amincissant lorsque l'on monte dans la série stratigraphique, affirmant observer des coquilles minces dans le Bégudien et des coquilles minces et épaisses dans le Rognacien.

Enfin, dans la synthèse de leurs travaux, Dughi et Sirugue (1976) fixent la diversité des coquilles à « dix sortes au minimum » appartenant aux sauropodes, théropodes et ornithopodes.

Penner (1985), confirme partiellement ces observations en reconnaissant trois types de coquilles sur les sites de : Roques-Hautes, La Cairanne (Rousset), Rousset « Erben », et trois nouvelles localités, avec des épaisseurs variant de 1,4 à 2,2 mm, sans amincissement des coquilles dans les niveaux du Rognacien supérieur. Penner conteste donc l'affirmation d'Erben *et al.* (1979) qui avaient trouvé sur le site de Rousset un amincissement des coquilles atteignant 90 % de l'échantillon dans l'horizon supérieur. Mais ces auteurs postulaient qu'une seule espèce (« *Hypselosaurus* ») avait pondus les œufs qu'ils étudiaient et par là même, attribuaient à cet amincissement des coquilles l'extinction de l'espèce par déshydratation de l'embryon et l'écrasement de la coquille.

Ils rejetaient donc les observations de Dughi et Sirugue (1957a, 1958a, 1958b, 1976) sur l'appartenance des différents types de coquilles à des espèces distinctes.

La diversité des coquilles restera une affaire confuse pendant encore dix ans, avant qu'une parataxonomie ne soit appliquée à ces fossiles (Vianey-Liaud *et al.*, 1994) et permette de reconnaître huit oo-espèces appartenant à la famille des mégaloolithidés présentes actuellement dans le Bassin d'Aix-en-Provence (Garcia et Vianey-Liaud, 2001 ; chapitre 5).

Si les études de Dughi et Sirugue n'ont guère permis de clarifier la diversité et la succession stratigraphique de ces fossiles, elles ont mis en évidence l'intérêt de ces fossiles comme marqueurs chronologiques tout au long du Bégudo-Rognacien et comme outil parataxonomique, elles ont permis de montrer que les différents types d'œufs étaient sans doute pondus par des espèces différentes, sans que le débat sur l'attribution de ces œufs à une ou des espèces ne soit tranché, en l'absence d'ossements associés.

## 6. RÉPARTITION SPATIALE DES ŒUFS ET DES PONTES

Dès la première étude des œufs nouvellement trouvés à Rousset, de Lapparent (1957) observe que ceux-ci sont habituellement groupés par cinq, ces regroupements correspondant sans doute à des nids. La taille de la ponte, la disposition des œufs et la structure du nid feront l'objet de plusieurs hypothèses par les auteurs ultérieurs.

Dughi et Sirugue (1958a), insistant sur la difficulté d'estimer le nombre d'œufs par nid en réalisant des observations de surface sans fouille, et compte tenu de l'érosion, signalent des pontes en file de deux à cinq œufs, voire douze, pondues à même le sol. Cette observation sera précisée dans une note ultérieure (Dughi et Sirugue, 1966) dans laquelle ces auteurs assurent que la ponte consiste en une à cinq files longitudinales, chacune pouvant compter quinze à vingt œufs. Ces pontes auraient été pondues à l'air libre, et non dans une fosse, et non incubés par les parents, compte tenu de l'absence de couche spongieuse

sous-jacente à la couche de cristaux de carbonate de calcium ; la couche spongieuse étant mécaniquement la plus résistante, elle est particulièrement épaisse chez les oiseaux afin de résister à l'écrasement produit par le poids de l'individu qui incube. À S contrario, son absence dans les coquilles d'œufs de dinosauriens implique donc une absence d'incubation (Dughi et Sirugue, 1958b).

Ces observations seront contestées par Erben *et al.* (1979) et Kérourio (1981b) qui remarquent que dans les pontes qu'ils ont examinées, les œufs sont groupés dans une dépression creusée dans le sol. Ces pontes rassemblent six à huit œufs (N=4), le diamètre de la fosse accueillant les œufs variant de 0,7 à 1,3 m de diamètre pour une profondeur de 0,7 à 0,8 m (Kérourio, 1981b). La faible résistance mécanique des coquilles associée à la probable **poïkilothermie\*** des adultes reproducteurs a donc conduit ces auteurs à imaginer l'existence d'un environnement climatiquement stable, tels que des débris végétaux couvrant une fosse creusée dans le sol, pour assurer la température constante nécessaire à l'incubation des œufs.

L'étude de la conductance des coquilles a confirmé cette hypothèse : la conductance de l'œuf **cléidoïque\*** dépend de la géométrie et du nombre de pores qui traversent la coquille, compromis évolutif entre les besoins de l'embryon en gaz assurant sa respiration et la limitation des pertes hydriques du liquide amniotique.

L'étude de Williams *et al.* (1984) a montré que les coquilles fossiles trouvées à Sainte-Victoire se caractérisaient par une conductance élevée indiquant un environnement humide et une faible tension des échanges gazeux ; ces conclusions confirment l'absence d'incubation assurée par les parents (c'est-à-dire des œufs déposés dans un nid ouvert à même le sol) et leur enfouissement dans des matériaux assurant la stabilité thermique de leur environnement.

Dans la première fouille étendue (50 m<sup>2</sup>) d'une zone de ponte à Rennes-le-Château (Aude), Cousin *et al.* (1994) observent que les deux types de répartition spatiale des œufs se trouvent côte à côte :

- 1) des arcs de cercles de deux, trois ou quatre œufs qui pourraient atteindre une douzaine d'œufs si ces arcs de cercles étaient reliés ; ces arcs de cercle pourraient correspondre aux « pontes en lignes » de Dughi et Sirugue (1958a) et mesureraient 1,3 à 1,7 m de diamètre ;
- 2) des pontes regroupant trois à huit œufs déposés dans des fosses de 0,35 m de profondeur max ; ces nids pourraient correspondre aux pontes observées par Kérourio (1981b).

Dans une fouille étendue (3225 m<sup>2</sup> x 3 m de profondeur) réalisée sur le site de Sextius-Mirabeau (Aix-en-Provence) par le MHNA en 2002, le nombre d'œufs par nid a pu être précisé par l'étude de 230 œufs (Garcia *et al.*, 2003) appartenant à cinq oo-espèces\* dont trois appartenant aux mégaloolithidés, oo-famille attribuée aux dinosauriens sauropodes sur la base des embryons fossilisés trouvés dans d'autres gisements : *Megaloolithus petralta* (N=188 œufs, N=32 pontes), *M. aureliensis* (N=36 œufs, N=10 pontes) et *Cairanolithus dughii* (N=6 œufs, N=1 ponte). Les niveaux fouillés ont été attribués au Campanien supérieur (= Rognacien inférieur) d'après les oo-espèces présentes.

Les observations réalisées sur le nombre d'œufs par ponte confirment la faible fécondité des espèces étudiées et précise le nombre moyen d'œufs par nid : 5,9 (1 à 13) œufs/nid pour *M. petralta* et 3,6 (1 à 10) œufs/nid pour *M. aureliensis*. Cette fécondité est néanmoins inférieure à celle observée chez les mégaloolithidés étudiés par Moratalla et Powell (1994) et Cousin (2002) = 8 à 12 œufs en moyenne.

Sur le site de Sextius-Mirabeau, 7 % des nids comportaient un ou des œufs non éclos (93 % du nombre total d'œufs de mégaloolithidés étudiés (N=256 œufs éclos) ; une seule ponte comportait uniquement des œufs non éclos (Turini, com. pers.). La densité observée des œufs et leur répartition stratigraphique étendue confirme donc les vues des auteurs précédents concernant la fidélité aux sites de reproduction (chapitre 3) et l'existence de colonies pluri-spécifiques déjà suggérée par Kérourio (1981b). En revanche, la présence de pontes en ligne suggérée par Dughi et Sirugue (1958a, 1966) n'a pas été confirmée (Cousin *et al.*, 1994, Garcia *et al.*, 2003), la disposition en ligne n'étant pas compatible avec une incubation des œufs, qu'ils soient couvés par une espèce homéotherme (hypothèse rejetée par Dughi et Sirugue, 1958b) ou disposés dans un tumulus de matériaux assurant une stabilité thermique (Williams *et al.*, 1984).

## 7. LES COQUILLES PATHOLOGIQUES ET L'EXTINCTION DES DINOSAURIENS

Deux autres observations de Lapparent (1957) feront l'objet de nombreux débats dans les deux décennies qui suivirent l'étude du site de Rousset : l'existence de coquilles doubles, attribuées à une pathologie, et l'amincissement des coquilles dans les horizons supérieurs.

De Lapparent (1957) estime à 4 % la proportion de coquilles bi-stratifiées sur le site de Rousset, proportion qu'Erben *et al.* (1979) élèvent à 10 % par la suite.

Ces coquilles bi- voire tri-stratifiées, qui peuvent atteindre 6,1 mm d'épaisseur, peuvent s'expliquer par une stase de l'œuf dans la partie terminale de l'oviducte avec suspension de l'activité métabolique de la femelle avant la ponte, phénomène connu chez les oiseaux (Dughi et Sirugue, 1958a). Ces auteurs suggèrent que ces stases pourraient être dues à un refroidissement climatique induisant un ralentissement du métabolisme d'espèces poïkilothermes sensibles aux variations de la température de la fin du Maastrichtien ; ces oscillations climatiques auraient entraîné la disparition rapide de ces espèces suite à une mortalité anormalement élevée des embryons (Dughi et Sirugue, 1976).

Cette théorie sera contestée par Kérourio (1981a) et Penner (1985). Dans une étude exhaustive des gisements des Bouches-du-Rhône et du Var ayant livré des fossiles de dinosauriens dans des niveaux d'âges Bégudien, Rognacien inférieur et supérieur, dans lesquels des lots de 100 à 1300 coquilles ( $\Sigma$  8420 coquilles) ont été collectés, Kérourio (1981a) observe que les coquilles pathologiques représentent en moyenne 1 % du total de tous les échantillons (0 à 3,8 %) sans augmentation significative dans les niveaux les plus récents. Enfin, sur 155 œufs entiers examinés, seuls trois possédaient des coquilles bi-stratifiées, dont deux œufs isolés et un œuf faisant partie d'une ponte dont les autres œufs étaient « normaux ».

Ces résultats sont confirmés par Penner (1985) qui a trouvé à Roques-Hautes six coquilles pathologiques seulement sur un échantillon de 700 coquilles.

De même, l'observation de Lapparent (1957) sur un amincissement des coquilles dans les horizons supérieurs des dépôts de Rousset sera largement commentée par Erben *et al.* (1979) qui y voient une pathologie entraînant une mortalité de l'embryon, et par conséquent une réduction de la fécondité et à terme l'extinction de l'espèce. Pour les auteurs, les coquilles pathologiques bi-stratifiées seraient trop épaisses pour permettre l'éclosion du jeune ou trop minces pour le protéger des agressions extérieures (dessiccation, cassure de la coquille) après la ponte. Le problème est que toute l'hypothèse de Erben *et al.* (1979) repose sur l'existence d'une seule et même espèce de titanosaurien (« *Hypselosaurus priscus* ») dans tous les niveaux étudiés, ce qui fut rapidement contesté (Kérourio, 1981b, Penner, 1985, Williams *et al.*, 1984), les œufs à coquille mince n'étant pas considérés comme pathologiques par ces auteurs, mais appartenant à une ou des espèces différentes.

Ces deux théories (doubles coquilles et coquilles minces) supposant une réduction de la fécondité des dinosauriens au Rognacien supérieur, liée ou non à des fluctuations climatiques, seront rapidement balayées avec l'entrée en scène de la théorie d'une extinction de masse Crétacé/Paléogène due à l'impact d'une météorite de grande taille dans le golfe du Mexique, popularisée par Alvarez *et al.* (1980).

## 8. CONCLUSION

Les recherches pionnières de Lapparent (1947, 1957) et de Dughi et Sirugue (1957a-b, 1958a-c, 1960, 1966, 1976) sur les œufs de dinosauriens de la haute vallée de l'Arc ont jeté les bases des recherches menées à partir des années 1980 sur ces gisements (chapitre 5).

Elles ont permis en premier lieu de préciser l'âge des dépôts étudiés, couvrant le Campanien supérieur (Bégudien et Rognacien inférieur) et le Maastrichtien (Rognacien supérieur), séparés par les calcaires de Rousset et de fixer localement et de manière définitive la limite Maastrichtien/Danien, séparant les étages locaux du Rognacien supérieur et du Vitrollien.

La recherche systématique des coquilles a permis de révéler dès les années 60 la présence d'affleurements bégudo-rognaciens étendus, depuis la commune de Meyreuil à l'ouest, jusqu'à la commune de Pourcieux à l'est, avec plusieurs dizaines de gisements paléontologiques dont certains, comme celui de Roques-Hautes, sont d'une importance internationale compte tenu de la densité des fossiles et de l'épaisseur des sédiments.

Ces recherches ont jeté les bases d'une cartographie des sites à protéger (Gomez, 1986, 1989), dont la première pierre a été la création d'une réserve naturelle nationale sur le secteur de Roques-Hautes et des Grands-Creux en 1994 (chapitre 1).

Elles ont aussi montré la diversité importante des coquilles, dont le nombre a été évalué à neuf types distincts par Dughi et Sirugue (1976), valeur proche des onze oo-espèces (non homologues avec les types de Dughi et Sirugue) actuellement reconnues dans les gisements Campano-Maastrichtien du Sud de la France (García et Vianey-Liaud, 2001).

En revanche, les observations relatées par ces auteurs sur la répartition spatiale et la réduction de fécondité des espèces ayant entraîné leur disparition n'ont pas été confirmées par les auteurs postérieurs.

La prise de conscience de l'intérêt de ces gisements, par leur étendue spatiale et temporelle, et par voie de conséquence de la diversité des espèces qu'on y trouve, reste sans doute l'apport majeur des études pionnières du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence. A l'issue de différentes campagnes de fouilles menées par le MHNA jusqu'en 2014, dont tout le matériel a été préparé, les collections totalisent 2194 restes osseux et œufs de reptiles fossiles, dont 1673 restes de dinosauriens (977 restes osseux + 231 lots d'œufs ou pontes + 465 lots de coquilles d'œufs). Ces collections ont été étudiées et figurées dans douze publications scientifiques (Cheylan et Dutour, 2015), constituant une référence régionale pour l'étude des dinosauriens du Sud de la France.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alvarez L. W., Alvarez W., Asaro F. et Michel H. V. (1980). Extra-terrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208 : 1095-1108.
- Babinot J.-F. et Durand J.-P. (1980). Les étages continentaux du Crétacé supérieur et du Paléocène en Provence. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières* 109 : 171-192.
- Bailly A. (1992). *Défricheurs d'inconnu : Peiresc, Tournefort, Adanson, de Saporta*. Edisud, Aix-en-Provence, 275 p.
- Billerey A., Dughi R. et Sirugue F. (1959). Les œufs de dinosaures et la datation des brèches de Sainte-Victoire. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 248 : 272-274.
- Biro, P. (1958). Les œufs de dinosauriens d'Aix-en-Provence. *Bulletin Mensuel des Musées et Collections de Genève* 3 : 3.
- Cheyran G. et Dutour Y. (2015). *Le récolement décennal des collections du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence. Note méthodologique et bilan du récolement*. Rapport de la Direction Régionale des Affaires Culturelles PACA, Aix-en-Provence, 97 p.
- Cojan I. et Moreau M.-G. (2006). Correlation of terrestrial climatic fluctuations with global signals during the Upper Cretaceous-Danian in a compressive setting (Provence, France). *Journal of Sedimentary Research* 76 : 589-604.
- Collot, L. (1880). *Description géologique des environs d'Aix-en-Provence*. Typographie Grollier, Montpellier, 234 p.
- Collot, L. (1890). Description du terrain crétacé dans une partie de la Basse-Provence. 2<sup>e</sup> partie : couches d'eau douce et généralités. *Bulletin de la Société Géologique de France* 19 : 74.
- Cousin R. (2002). Organisation des pontes de dinosauriens de la parafamille des Megaloolithidae Zhao, 1979. *Société Géologique de Normandie et Amis du Muséum du Havre* 89 : 5-177.
- Cousin R., Breton G., Fournier R. et Gomez N. (1987). La campagne de « fouilles préliminaires » sur les lieux de pontes de dinosaures de Rousset-sur-Arc (Bouches-du-Rhône). *Bulletin Trimestriel de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre* 74 : 5-15.
- Cousin R., Breton G., Fournier R. et Watté J.-P. (1994). Dinosaur egg-laying and nesting in France. In : *Dinosaur's eggs and babies*, Carpenter K., Hirsch H. F. et Horner J. (Eds), Cambridge University Press : 56-74.
- Dérogat M. (1935). Les œufs fossiles de dinosaures. *La Terre et la Vie* 6 : 195-201.
- Dughi R., Rey R. et Sirugue F. (1959). La limite supérieure du Crétacé continental dans le bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 249 : 2370-2372.
- Dughi R. et Sirugue F. (1957a). Les œufs de dinosauriens du bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 245 : 707-710.
- Dughi R. et Sirugue F. (1957b). La limite supérieure des gisements d'œufs de dinosauriens du bassin d'Aix-en-Provence. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 245 : 907-909.
- Dughi R. et Sirugue F. (1958a). Sur les œufs de dinosaures du bassin fluvio-lacustre de Basse-Provence. *Comptes Rendus du 83<sup>e</sup> congrès des Sociétés Savantes*, Aix-en-Provence : 183-205.
- Dughi R. et Sirugue F. (1958b). Observations sur les œufs de dinosaures du bassin d'Aix-en-Provence : les œufs à coquille bi-stratifiées. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 246 : 2271-2274.
- Dughi R. et Sirugue F. (1958c). Les œufs de dinosaures du bassin d'Aix-en-Provence : les œufs du Bégudien. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 246 : 2386-2388.
- Dughi R. et Sirugue F. (1960). Les dinosaures vivaient en basse Provence au Maastrichtien (Bégudien). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 251 : 2387-2389.
- Dughi R. et Sirugue F. (1966). Sur la fossilisation des œufs de dinosaures. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 262 : 2330-2332.
- Dughi R. et Sirugue F. (1976). L'extinction des dinosaures à la lumière des gisements d'œufs du Crétacé terminal du sud de la France, principalement dans le bassin d'Aix-en-Provence. *Paléobiologie Continentale* 7 : 1-39.
- Durand J.-P. et Tempier C. (1962). Etude tectonique de la zone des brèches du massif de Sainte-Victoire dans la région du Tholonet (Bouches-du-Rhône). *Bulletin de la Société Géologique de France*, Série 7, IV (1) : 97-101.
- Erben H. K., Hoefs J. et Wedepohl K. H. (1979). Paleobiological and isotopic studies of eggshells from a declining dinosaur species. *Paleobiology* 5 : 380-414.
- Frigara A. (1956). Les œufs de dinosauriens de Rousset (Bouches-du-Rhône). *Bulletin de la Société Linnéenne de Provence* 21 : 1-12.
- Garcia G. et Vianey-Liaud M. (2001). Dinosaur eggshells as biochronological markers in Upper Cretaceous continental deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 169 : 153-164.
- Garcia G., Dutour Y., Cojan I., Valentin X. et Cheylan G. (2003). Long-term fidelity of Megaloolithid egg-layers to a large breeding-ground in the Upper Cretaceous of Aix-en-Provence (Southern France). *Palaeovertebrata* 32 : 109-120.
- Germain J. (1958). Les œufs de dinosauriens fossiles du Vitrollien de Roques-Hautes. *Annales de la Société des Sciences Naturelles de Toulon et du Var*, 10 : 99-105.
- Gervais, P. (1873). Vertèbre de l'*Hypselosaurus priscus* trouvée à Pugère (Bouches-du-Rhône). *Journal de Zoologie* 2 : 469-471.
- Gervais P. (1877). De la structure des coquilles calcaires des œufs et caractères que l'on peut en tirer. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 84 : 159-165.
- Ginsburg L. (1980). Les gisements à œufs de dinosaures du Crétacé terminal du Midi de la France et la physiologie des Ornithopodes. *Mémoires de la Société Géologique de France* 139 : 109-110.
- Gomez N. (1986). *Étude préalable pour la protection des gisements fossilifères de Sainte-Victoire. Etude technique*. Rapport du Conseil régional – Direction Régionale de l'Architecture et de l'Environnement PACA. 69 p.
- Gomez N. (1989). *Inventaire et parcellaire des sites à œufs de dinosaures de la Sainte-Victoire (Bouches-du-Rhône) en vue de leur protection*. Réserve Naturelle Nationale Géologique de Haute-Provence. Rapport de l'Agence Régionale pour l'Environnement – Direction Régionale de l'Architecture et de l'Environnement PACA. 25 p.
- Kérourio P. (1981a). La distribution des coquilles d'œufs de dinosauriens multi-stratifiées dans le Maestrichtien continental du sud de la France. *Géobios* 14 : 533-536.

- Kérourio P. (1981b). Nouvelles observations sur le mode de nidification et de ponte chez les dinosauriens du Crétacé terminal du Midi de la France. *Comptes-Rendus Sommaires de la Société Géologique de France* 1 : 25-28.
- Matheron P. (1869). Notice sur les reptiles fossiles des dépôts fluvio-lacustres Crétacés du bassin à lignite de Fuveau (Bouches-du-Rhône). *Mémoire de l'Académie Impériale des Sciences, Belles Lettres et Arts de Marseille* : 345-379.
- Lapparent, A.-F. de (1947). Les dinosauriens du Crétacé supérieur du Midi de la France. *Mémoires de la Société Géologique de France* 56 : 1-54.
- Lapparent, A.-F. de (1957). Les œufs de dinosauriens fossiles de Rousset (Bouches-du-Rhône). *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, 245 (1) : 546-549.
- Moratalla J. J. et Powell J. E. (1994). Dinosaur nesting patterns. In : *Dinosaur's eggs and babies*, Carpenter K., Hirsch H. F. et Horner J. (Eds), Cambridge University Press: 37-46.
- Penner M. M. (1985). The problem of dinosaur extinction. Contribution of the study of Terminal Cretaceous eggshells from Southeast France. *Géobios* 18 : 665-669.
- Saporta G. de (1871). La flore fossile d'Aix-en-Provence. *Annales des Sciences Naturelles et Botaniques*, 17 quatrième série : 202-311.
- Saporta G. de (1872a). La flore fossile d'Aix-en-Provence. *Annales des Sciences Naturelles et Botaniques*, 17 cinquième série : 5-44.
- Saporta G. de (1872b). La flore fossile d'Aix-en-Provence. *Annales des Sciences Naturelles et Botaniques*, 18 : 23-446.
- Saporta G. de (1889). *Dernières adjonctions à la flore fossile d'Aix-en-Provence*. Masson éd., Paris. 1-192 pp.
- Sepulveda J.-J. et Dutour Y. (2006). Historique du muséum d'histoire naturelle d'Aix-en-Provence. In : *Histoires Naturelles du Pays d'Aix*. Ville d'Aix-en-Provence (Ed.) : 9-43.
- Straelen, V. van et Denaeyer, M. E. (1923). Sur des œufs fossiles du Crétacé supérieur de Rognac en Provence. Partie paléontologique. *Bulletin de l'Académie Royale de Belgique*, séance du 6 janvier 1923 : 14-26.
- Touraine, F. (1961). Les grands traits d'une structure nouvelle proposée pour le massif de Sainte-Victoire. *Bulletin de la Société Géologique de France*, Série 7, VI (4) : 545-553.
- Vianey-Liaud M., Malan P., Buscaïl O. et Montgelard C. (1994). Review of French Dinosaur's eggshells : eggshell morphology, structure, mineral and organic composition. In : *Dinosaur's eggs and babies*, Carpenter K., Hirsch H. F. et Horner J. (Eds), Cambridge University Press : 151-183.
- Voss-Foucard M. F. (1968). Paléo-protéines des coquilles fossiles d'œufs de dinosauriens du Crétacé supérieur de Provence. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 24 : 31-36.
- Williams D. L. G., Seymour R. S. et Kérourio P. (1984). Structure of fossil dinosaur eggshell from the Aix basin, France. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 45 : 23-37.



Oeuf fossilisé de dinosaure présenté à Raymond Dughi (à gauche) par François Sirugue (à droite) pour les journalistes de l'United Press International (New York) le 12 août 1957 (Archives personnelles Thierry Tortosa).



© Thierry Tortosa

## GÉRALDINE GARCIA

*Maître de Conférences et responsable des collections scientifiques de l'Université de Poitiers, TSA 51106, 6 rue M. Brunet, 86022 Poitiers cedex, France.*

## MONIQUE VIANEY-LIAUD

*Professeur émérite à l'ISEM UMR 5554, UMI/CNRS/IRD/EPHE, cc064, Université de Montpellier, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05, France.*

### Mots-clés :

Paléontologie,  
Classification  
Parataxonomie,  
Oeufs de dinosauriens,  
Crétacé supérieur,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

*Article reçu le 8 novembre 2017  
Article accepté le 27 mai 2020*

# RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE : UN SITE-LABORATOIRE POUR L'ÉTUDE DES OEUFS DE DINOSAURIENS

GÉRALDINE GARCIA & MONIQUE VIANEY-LIAUD

### Résumé :

L'étude des œufs fossilisés de dinosauriens de Provence a pris son essor dans les années 1980-1990, venant assoir définitivement la réputation internationale de notre région pour sa richesse et son intérêt scientifique. Cet article expose dans un premier temps le contexte de ces nouvelles recherches universitaires menées dans le bassin d'Aix-en-Provence et les grands principes de géologie et de stratigraphie servant de cadre d'étude. Puis, la méthodologie et le système de classification parataxonomique des œufs sont exposés afin d'en comprendre leur identification. Enfin, un focus est effectué sur le site de Roques-Hautes, véritable laboratoire à ciel ouvert, où sont présentés la coupe de référence, la diversité des œufs découverts et leur intérêt en tant qu'outil de datation relative et de corrélations biostratigraphiques, entre les bassins sédimentaires provençaux ou avec les autres bassins contemporains du Sud de l'Europe.

### Abstract :

The study of the fossilized dinosaurs' eggs from Provence significantly risen between the 1980's-1990's, definitively establishing the international reputation of our region for its richness and scientific interest. This article first exposes the context of these new academic researches conducted in Aix-en-Provence Basin and the main principles of geology and stratigraphy serving as a framework for the study. Then, the methodology and the parataxonomic classification system for fossilized eggs are presented in order to understand their identification. Finally, a focus is made on the Roques-Hautes locality, a real open sky laboratory, where are presented the reference log, the diversity of excavated eggs and their interest as a tool for relative dating and for biostratigraphical correlations between sedimentary basins in Provence or with other contemporary basins in southern Europe.

## 1. INTRODUCTION

Si les premiers œufs de dinosauriens provençaux ont été identifiés près de Rognac, la région de Sainte-Victoire est devenue le site le plus riche en œufs et le plus productif en termes de résultats scientifiques. Le site de Roques-Hautes offre la succession la plus complète des divers types d'œufs (**oo-genres\*** et **oo-espèces\***) du bassin d'Aix-en-Provence, dans une série continue de dépôts sédimentaires. Les découvertes s'y sont succédé depuis les années 1970 et intensifiées au début des années 1990. Le classement en réserve naturelle nationale des sites des Grands-Creux et de Roques-Hautes (chapitre 1), a permis de mettre fin aux prélèvements sauvages d'œufs et de nids menés à des fins de collection particulière ou de commerce. De ce fait, les études paléontologiques, géologiques et sédimentologiques se sont développées entre 1994 et 2014, avec l'aval du Conseil départemental des Bouches-du-Rhône, gestionnaire de la réserve naturelle.

Un petit retour en arrière permet de saisir le contexte historique des études sur les œufs provençaux. Philippe Matheron (1869a-b) récolte près de la gare de Rognac des « *segments de sphère ou d'ellipsoïde très énigmatiques, à l'examen desquels plusieurs paléontologistes ont souvent exercé leur patience. Tout bien considéré, il paraîtrait que ce sont des fragments d'œuf* ». Paul Gervais (1877), alors professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, fait réaliser des lames minces de ces œufs, ainsi que d'œufs d'oiseau, de tortue et de crocodile. Il en conclut que les grands œufs fossiles dans le terrain de Rognac n'ont pas appartenu à un oiseau, mais bien à un reptile de classification indéterminée, ayant par la structure de la coquille de ses œufs une incontestable analogie avec ceux de certains reptiles, crocodiles et tortues (Taquet, 2001). Ensuite, ces objets fossiles sont restés largement à l'écart de l'évolution de la paléontologie, et notamment en dehors de la reconstitution de l'histoire et de l'évolution des dinosauriens.

Les conservateurs du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, Raymond Dugui et François Sirugue (1957, 1958, 1962), ont longtemps tenté en vain d'intéresser les scientifiques aux nombreuses trouvailles d'œufs qu'ils avaient réalisées dans le bassin d'Aix-en-Provence, près du Cengle et de Sainte-Victoire : mais il était encore trop tôt (Photo 1). Pourtant, dans leurs publications, Dugui et Sirugue ont signalé et décrit une grande variété de morphologies, d'épaisseurs et de formes parmi les œufs récoltés (chapitre 4).



Photo 1 : F. Sirugue, M. Galito, G. Laurent et R. Dugui récoltant des fragments de coquilles d'œufs à Roques-Hautes en 1957 (Photo Henri Ely, Aix-en-Provence).

L'intérêt des paléontologues européens s'est ranimé à partir des années 1970 quand la question de l'extinction totale des dinosauriens est revenue à l'ordre du jour. Les terrains attribués alors aux étages géologiques locaux Bégudien et Rognacien, avec notamment leurs épais limons rouges renfermant des œufs et des ossements de « reptiles », surmontés par des couches d'autres limons rouges qui en sont dépourvus et attribuées au « Vitrollien » (Matheron, 1878-1880), sont apparus particulièrement favorables à l'étude des effets de l'extinction massive de la fin du Crétacé (il y a environ 66 millions d'années). Ainsi, dès 1980 avons-nous prospecté les niveaux du Crétacé supérieur de Provence (B. Sigé, Y. Kérourio et M. Vianey-Liaud) et parmi eux, ceux du site de Roques-Hautes. Par ailleurs, en 1990, à la demande de l'Agence Départementale pour la Protection des Sites Sensibles du Conseil Général des Bouches-du-Rhône, le Muséum d'Histoire Naturelle du Havre est intervenu avec le Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille pour faire une fouille préliminaire sur le site des Grands-Creux (Cousin, 2002 ; chapitre 1). Il s'agissait alors d'évaluer la faisabilité d'un musée de site, projet qui a été ensuite abandonné.

Concernant les œufs de Provence, deux approches se sont alors développées. La première approche s'est attachée à décrypter leur composition chimique. Elle sera mise en œuvre d'abord par Voss-Foucart (1968), puis Erben *et al.* (1979), Dauphin (1990), Mallan (1990), Buscail (1991), Dauphin et Jaeger (1991), Dauphin (1992, 1994), Marin et Dauphin (1991), Cojan *et al.* (2003). Elle s'inscrit dans la recherche des conditions paléo-environnementales qui ont accompagné l'histoire des dinosauriens. La deuxième approche a voulu dans un premier temps placer les différents types d'œufs dans une classification « universelle » qui leur soit propre, en définissant des critères morpho-structuraux. Dans un deuxième temps, il fallait essayer de les attribuer à des espèces de dinosauriens connues. Cet axe s'est inscrit dans une recherche sur l'évolution de la diversité des dinosauriens au cours du temps dans le Sud de la France. C'est de la deuxième approche dont il est question dans le présent article.

## 2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Avant de développer les travaux sur les œufs de dinosauriens du site de Roques-Hautes, il est indispensable de traiter des terrains dans lesquels on les rencontre. En effet, l'étude scientifique de ces fossiles nécessite la connaissance d'un cadre stratigraphique et géochronologique clair et précis, si l'on veut comprendre leur histoire.

### 2.1 PRINCIPES DE GÉOLOGIE

Rappelons quelques principes et méthodes. Un principe de base est le **principe de superposition** : les couches sont de plus en plus récentes de bas en haut de leur succession sur le terrain. Les fossiles sont localisés dans des couches constituées de roches sédimentaires. Dans notre cas, il s'agit de couches formées en milieu continental et plus précisément en domaine fluvio-lacustre. Le dépôt à l'origine de ces roches provient de la décantation ou de la précipitation d'éléments dans des étendues d'eau plus ou moins profondes, marécages, étangs, lacs, fleuves. Ce dépôt constitue d'abord un sédiment meuble, généralement horizontal, avant d'être soumis aux aléas du temps (émersion, installation éventuelle d'un sol végétalisé, dessiccation, altération, érosion partielle...).

S'il est recouvert par une nouvelle étendue d'eau, le même processus se renouvelle, aussi longtemps que les conditions environnementales et tectoniques le permettent. Ce fut le cas sur le site à l'origine des affleurements de Roques-Hautes. La majeure partie des couches à œufs sont d'anciens limons de plaine d'inondation, régulièrement déposés, puis émergés, recouverts de végétation dans laquelle les dinosauriens pondaient, et transformés en sols avant d'être à nouveau inondés (chapitre 4).

La **succession** des couches enregistre donc le temps qui s'est écoulé, sachant cependant qu'une fraction du temps n'est jamais représentée dans les sédiments, c'est celui qui correspond aux phases d'émersion, d'altération, etc... entre deux dépôts. Il faut aussi repérer les « accidents » dus à la tectonique qui peut, lors de plissements, renverser l'ordre des couches, ou bien, en provoquant des cassures (failles) mettre en contact des couches qui ne l'étaient pas initialement lors de la sédimentation. Et la tectonique qui est à l'origine de la montagne Sainte-Victoire a beaucoup perturbé l'ordre des strates (chapitre 2).

Lorsqu'elles se déposent dans un bassin suffisamment vaste, les couches sédimentaires ont une grande extension horizontale ; elles sont de nature relativement homogène (même **faciès\***) et l'on peut considérer que tous les points de cette couche sont isochrones (déposés en même temps). Mais, en milieu continental, les variations latérales de faciès sont nombreuses, car les bassins de sédimentation peuvent être limités géographiquement (chenaux de rivières, marécages ou lacs plus ou moins étendus). Par ailleurs, les mêmes faciès peuvent se retrouver à des moments différents, dans des zones géographiques plus ou moins éloignées. Il n'est alors pas possible de mettre ces faciès en corrélation temporelle. C'est le cas des calcaires dits de Rognac. En effet, sur le site de la commune de Rognac, dans la partie occidentale du bassin d'Aix-en-Provence, près de l'étang de Berre, il existe deux formations calcaires rognaciennes. La plus basale, presque au niveau de l'étang, est celle de la gare de Rognac. La plus spectaculaire est située plus haut dans la série, c'est la formation des calcaires de Rognac proprement dit qui sert de soubassement à la ville de Vitrolles. Le calcaire que l'on rencontre dans la partie orientale du bassin d'Aix-en-Provence, à Rousset, classiquement appelé « calcaire de Rognac », correspond en fait seulement au calcaire de la Gare de Rognac.

Par contre, des événements chimiques repérés mondialement dans les successions stratigraphiques (pics brutaux de température comme à la limite Paléocène-Eocène, il y a 56 millions d'années, ou glaciations, comme à la limite Eocène-Oligocène, il y a 33,9 millions d'années, ou épisodes très arides, etc.) peuvent constituer des marqueurs dans une succession de couches, et servir de points de corrélation entre des séries sédimentaires géographiquement séparées (Cojan, 1989 ; Cojan *et al.*, 2003 ; Cojan et Moreau, 2006).

Les fossiles sont les témoins d'un phénomène irréversible (comme le temps !) : l'évolution de la vie. Les espèces incluses dans les strates portent la marque du temps qui s'écoule. Certaines espèces se transforment peu ou pas avec le temps et on les retrouve alors dans plusieurs couches successives. Néanmoins, elles disparaissent à un moment donné, et peuvent être remplacées par d'autres espèces. Extinctions et apparitions sont alors des éléments marquant ces ruptures de l'enregistrement fossilifère. Elles constituent des marqueurs utilisés pour vérifier la contemporanéité des strates, c'est-à-dire faire des corrélations. Des espèces ne disparaissent pas réellement : elles sont remplacées par d'autres qui en sont issues, par évolution. Alors, les caractères de ces espèces, différents et propres à chacune et qui servent à les définir, sont de précieux marqueurs du temps. Les espèces représentées par les différents types d'œufs de dinosaures seront de ceux-là (Vianey-Liaud *et al.*, 1994 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2001a).

## 2.2. STRATIGRAPHIE DU CRÉTACÉ TERMINAL DANS LE BASSIN D'AIX-EN-PROVENCE

Les formations sédimentaires fluviolacustres ayant livré des restes de reptiles (ossements et œufs) ont été longtemps attribuées aux étages continentaux locaux Bégudien (défini sur la commune de Fuveau, Bouches-du-Rhône, près du lieu-dit La Bégude) et Rognacien (défini à Rognac, Bouches-du-Rhône, entre l'étang de Berre et la corniche de Vitrolles) (Villot, 1883 ; Babinot et Durand, 1980).

L'**échelle géochronologique globale de référence** ou GTS (Gradstein *et al.*, 2012 ; figure 1), comprend quant à elle des étages définis sur des coupes marines réputées plus complètes (Campanien-Maastrichtien pour le Crétacé terminal). Cette échelle est étalonnée par des datations radiométriques sur des coupes-types, datations régulièrement mises à jour par l'utilisation des méthodes de datation les plus performantes et les coupes-types les plus complètes. Elle est par ailleurs mise en regard d'une **échelle géomagnétique\***.

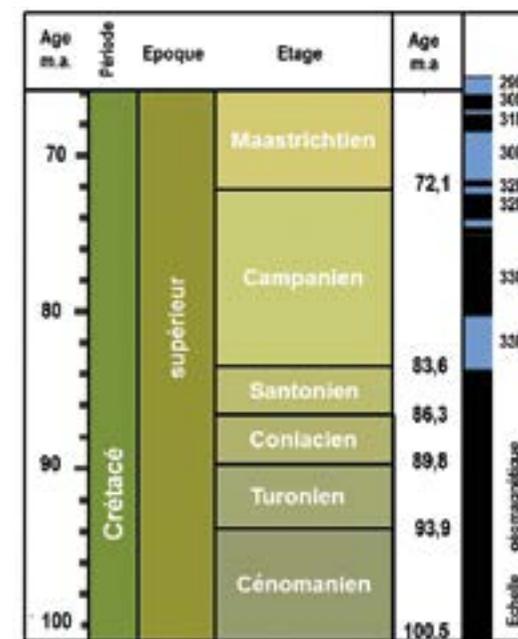


Figure 1 : Extrait de l'échelle géochronologique globale (Gradstein *et al.*, 2012), réduite au Crétacé supérieur, avec indication des âges des limites d'étages en millions d'années (m.a.). À droite, l'échelle des inversions du champ magnétique terrestre (N = polarité normale, en noir ; R = polarité inverse, en bleu), avec numérotation des chrons de 33 N à 29 R. La limite Crétacé-Paléogène est située dans le chron inverse 29R.

Les étages continentaux locaux ne sont pas aisément corrélables avec la GTS, en l'absence de roches contenant des éléments radioactifs. Les fossiles comme témoins de l'évolution de la vie sont des marqueurs précieux, encore faut-il qu'ils aient été étudiés et leur succession dans le temps établie. Des ossements dinosauriens ont été trouvés depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle dans des sites dispersés dans ces formations bégudo-rognaciennes. Où se placent ces ossements (et les espèces qu'ils représentent) sur l'échelle géochronologique globale : en regard du Campanien ? du Maastrichtien ? Les dinosauriens ont-ils disparu à la fin du Crétacé, ou bien ont-ils persisté au tout début de l'ère Tertiaire ? C'est pour répondre à ces questions que des investigations ont été lancées dans le bassin d'Aix-en-Provence, depuis l'étang de Berre jusqu'au pied de la montagne Sainte-Victoire, au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

## 2.3. LES DÉBUTS D'UN RENOUVEAU : LES ANNÉES 1980-1990

Au début des années 1980, la question des causes de l'extinction massive de la fin du Mésozoïque a connu un regain d'intérêt avec l'hypothèse de la chute d'une météorite (Alvarez *et al.*, 1980). Décélée d'abord en Italie, l'anomalie en iridium - considérée comme marqueur de la chute de la météorite - était retrouvée principalement dans des sédiments continentaux en Amérique du Nord et recherchée partout ailleurs, dans les forages sous-marins comme dans les dépôts continentaux. Or, les terrains continentaux enregistrant le passage Crétacé-Paléocène sont très rares, hors Amérique du Nord et Chine.

Le fait qu'ils soient bien développés dans le Bassin d'Aix-en-Provence a conduit plusieurs équipes françaises et européennes à s'y intéresser. Les travaux de Médus (1972) et de Médus *et al.* (1992) sur les restes de la flore fossile (pollen, restes d'algues vertes charophytes) ainsi que ceux d'Ashraf et Erben (1986) montrent un changement drastique de la flore au sein des calcaires sur lesquels repose le village de Rousset. D'une végétation **thermophile\*** et de climat relativement humide, on passe à une flore à **gymnospermes\***, notamment, qui fournit un signal d'aridité. Ces auteurs en concluent que ce changement témoigne du passage entre le Crétacé et le Paléogène. En conséquence, les nombreux œufs que l'on récolte entre Rousset et les conglomérats du « Poudingue de la Galante » au pied du Cengle témoigneraient de la persistance des dinosauriens au début du Tertiaire en Provence.

Cette conclusion a soulevé de nombreuses interrogations et relancé les études pluri-disciplinaires sur le bassin d'Aix-en-Provence. Ainsi un premier bilan des investigations publié plaça la limite Crétacé-Paléogène (K/Pg) après les derniers niveaux à coquilles d'œufs (Jaeger et Westphal, 1989). L'essentiel des travaux géologiques réalisés alors, qu'il s'agisse des analyses minéralogiques, paléomagnétiques, géochimiques, palynologiques et paléontologiques (coquilles d'œufs et ossements) l'a été dans le bassin d'Aix-en-Provence, au sud du Cengle, et dans la région de Rognac-Vitrolles. Une seule coupe (partielle) a été réalisée sur le site de Roques-Hautes par Hansen *et al.* (1989), afin d'en analyser le paléomagnétisme. La coupe étudiée est celle d'un ravineau à Roques-Hautes (figure 2). Cette coupe, de 54 m d'épaisseur totale, se termine par 2 mètres de calcaire. Les auteurs considèrent que, compte tenu de la tectonique qui affecte la zone de Roques-Hautes, les résultats paléomagnétiques sont à prendre avec précaution. Ce qui est clair, c'est que leur étude n'a pas porté sur toute la hauteur de la coupe de Roques-Hautes : ils n'ont pas considéré toute la série de strates qui surmonte les calcaires. Ce fut aussi le cas pour la coupe levée par Cousin *et al.* (1994) et Cousin (2002) où les mesures furent effectuées seulement jusqu'au niveau des calcaires, dont ils surestimaient l'épaisseur puisqu'ils lui attribuaient 100 mètres.

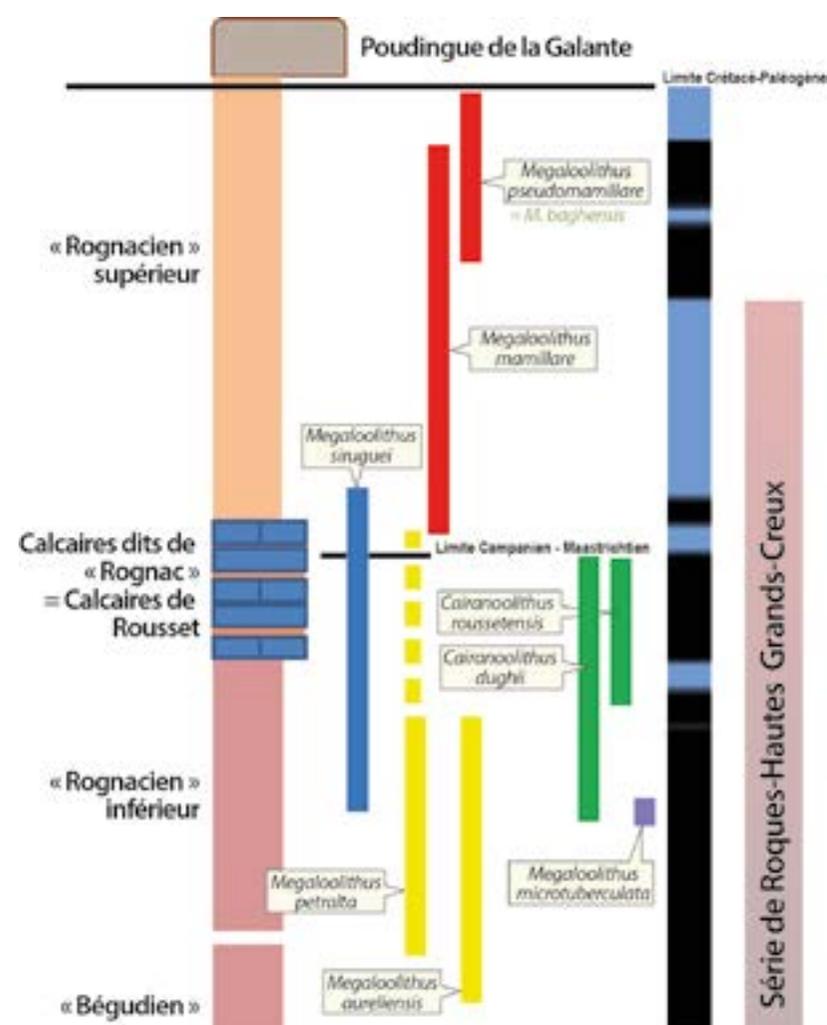


Figure 2 : Série sédimentaire du Crétacé terminal au sud de la Montagne Sainte-Victoire (de Roques-Hautes au sud du Cengle), avec indication de la répartition des oo-taxons, en regard de l'échelle géomagnétique. Le « Rognacien » supérieur correspond au Maastrichtien, tandis que le « Rognacien » inférieur et peut-être une partie du « Béguidien » correspondent au Campanien. Les calcaires de la coupe de Roques-Hautes et de Rousset (longtemps dits « de Rognac ») sont l'équivalent chronologique du calcaire de la gare de Rognac, et non du calcaire de Rognac, qui est situé plus haut et constitue le soubassement de la ville de Vitrolles. La succession des oo-taxons\* est la même de part et d'autre du Cengle et dans la région de Berre-Rognac-Vitrolles.

L'ensemble des travaux magnétostratigraphiques, géochimiques, stratigraphiques et paléontologiques menés sur l'ensemble du bassin d'Aix-en-Provence jusqu'à ce jour a conduit à un consensus sur la place de la limite Crétacé-Tertiaire dans l'intervalle de la formation dite du Poudingue de la Galante. Sur le site de Rousset, la limite entre les étages Campanien et Maastrichtien est ainsi située au sein du calcaire rognacien de Rousset, là où Erben plaçait auparavant la limite Crétacé – Tertiaire.

### 3. COMPRENDRE LES BASES DE L'ÉTUDE SCIENTIFIQUE POUR L'IDENTIFICATION DES OEUFS

À partir de Dughi et Sirugue (chapitre 4), en passant par Erben (1970), Kérourio (1981, 1982) et Penner (1983, 1985) quelques tentatives de typologie des œufs de Provence ont été tentées. Mais chacun avait son mode de désignation des types, utilisant les mêmes premières lettres de l'alphabet ou les mêmes premiers nombres pour des types pas nécessairement équivalents. Par ailleurs, ces types ne sont pas toujours localisés précisément dans des coupes ou conservés en collection avec leurs origines. Loin de là, en Chine, une école naissait qui allait formaliser l'analyse structurale des coquilles d'œufs. Initiée par Young (1954, 1965), elle a été développée notamment par Zhao (Zhao, 1975, 1979, 1994 ; Zhao *et al.*, 1991). Leur méthode a été suivie et développée par Mikhaïlov (1987, 1991, 1992, 1994, 1997) et par Hirsch (Hirsch, 1989, 1994, 1996 ; Hirsch et Packard, 1987 ; Hirsch et Quinn, 1990). Progressivement, un système de classification a été mis en place, dit parataxonomique parce qu'il ne recouvre pas la classification (taxinomie) des dinosauriens basée sur les éléments squelettiques : il lui est parallèle. Ce système ne s'applique pas seulement aux dinosauriens mais à tous les **amniotes\*** aussi bien actuels que fossiles. C'est celui que nous avons appliqué aux œufs du Crétacé supérieur du Sud de la France (Vianey-Liaud, 1992, 1994 ; Vianey-Liaud *et al.*, 1994 ; Garcia, 1995, 1998, 2000 ; Garcia et Vianey-Liaud, 2000 ; Garcia *et al.*, 2000a-b, 2001a).

#### 3.1. SYSTÈME DE CLASSIFICATION DES OEUFS

Malgré la forme simple d'un œuf, les critères morphologiques et structuraux pour distinguer les oo-taxons sont relativement nombreux. Il s'agit de la forme des œufs, des types d'ornementation des surfaces externe et interne de l'œuf, de l'épaisseur de la coquille ainsi que des caractères de la microstructure cristalline. En effet, les coquilles d'œufs sont constituées de très fins cristaux de carbonate de calcium (calcite, généralement) s'organisant en unités à partir de noyaux de cristallisation liés à la membrane organique basale (figure 3) Initialement, Mikhaïlov définissait de grands types structuraux et des morphotypes fondés sur la morphologie des unités de cristallisation ainsi que sur la topographie du système de canaux et de pores perforant la coquille pour assurer la respiration de l'embryon. Au sein de ces types basaux et ces morphotypes, des **oo-familles\***, oo-genres et oo-espèces ont été définis. Les limites de ce système de clé taxinomique sont apparues et il va être progressivement abandonné (Vianey-Liaud et Zelenitsky, 2003) : seules les trois dernières catégories parataxonomiques sont apparues pertinentes. Les oo-familles reposent sur l'organisation générale des unités, leurs connections et leur structuration de la base au sommet, la topographie des pores et canaux et l'ornementation extérieure. Les oo-genres se distinguent en plus par la forme générale de l'œuf ; les oo-espèces sont définies plutôt sur des critères quantitatifs (épaisseur, taille, arrangement des réseaux de pores sur la surface externe, détails de l'ornementation).

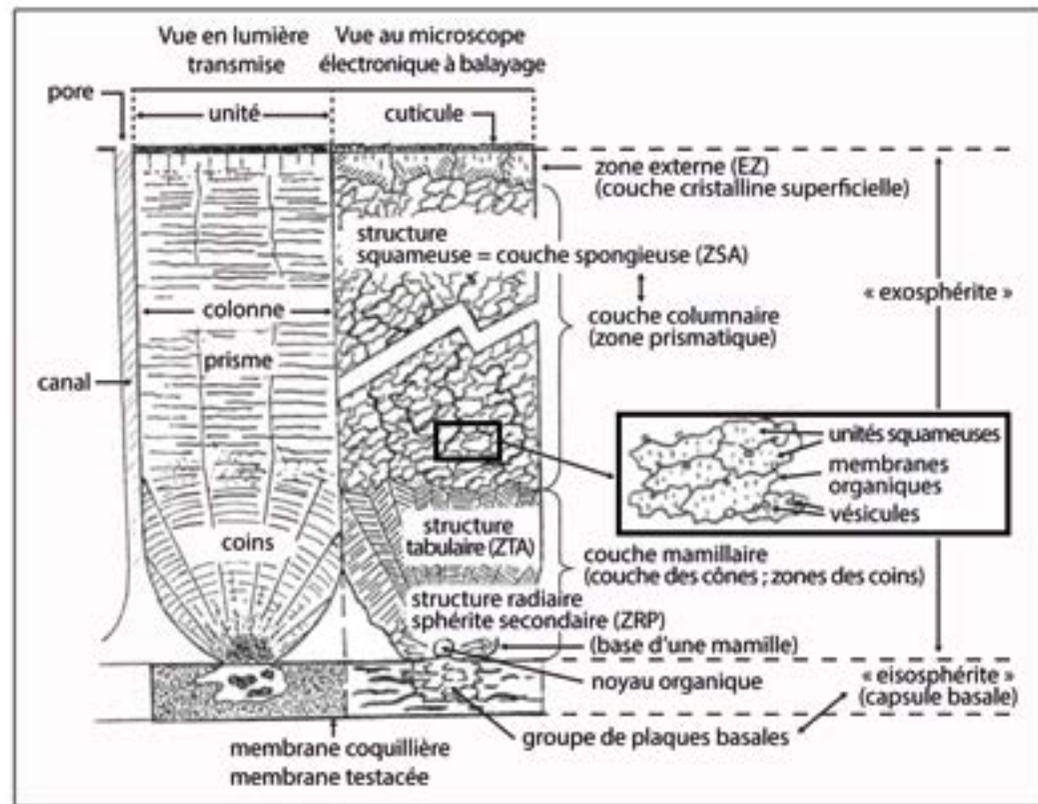


Figure 3 : Définition de morphotypes (basic types) de coquilles d'œufs d'après la microstructure des unités cristallines constitutives de ces coquilles. D'après Mikhaïlov (1991).

Par ailleurs, il est indispensable de décrire et prendre en compte la variabilité de tous ces critères. Comme dans tout organisme, on observe chez les oo-taxons une variation des caractères, au sein d'un même œuf ou au sein d'une ponte. Cette variation fait partie des critères de définition d'une oo-espèce (comme c'est le cas pour une espèce : tous les individus d'une même espèce ne sont pas exactement semblables). Par ailleurs, au cours de sa fossilisation, le tissu minéralisé de l'œuf peut subir des recristallisations ou des altérations de sa structure initiale (processus diagenétiques). Il est fondamental de les déceler avant toute interprétation des structures et surtout, toute analyse chimique (Dauphin 1990, 1992, 1994 ; Garcia, 1998).

L'étude des œufs actuels a révélé que tous les membres d'un même grand groupe (même taxon de rang élevé : Tortues, Crocodiles, Geckos, Oiseaux) présentaient une même organisation structurale de la coquille (Mikhaïlov *et al.*, 1996 ; Kohring, 1999 ; figure 4 et photo 2). Il en est de même pour l'ensemble des fossiles attribués aux « Dinosauriens ». La combinaison des critères morfo-structuraux a conduit à définir des oo-familles, oo-genres et oo-espèces. Actuellement une douzaine d'oo-familles a été définie pour les coquilles d'œufs de dinosauriens (y compris les oiseaux). Parmi elles, très peu sont mises en regard de groupes taxinomiques : cela n'est possible que lorsque les œufs sont embryonnés et que le squelette de l'embryon est suffisamment ossifié, pour qu'il soit identifiable (figure 5). Les conditions de fossilisation des œufs dans le bassin d'Aix-en-Provence n'ont pas permis de telles préservations et donc la plupart des oo-espèces ne peuvent trouver d'équivalent dans la classification des dinosauriens.

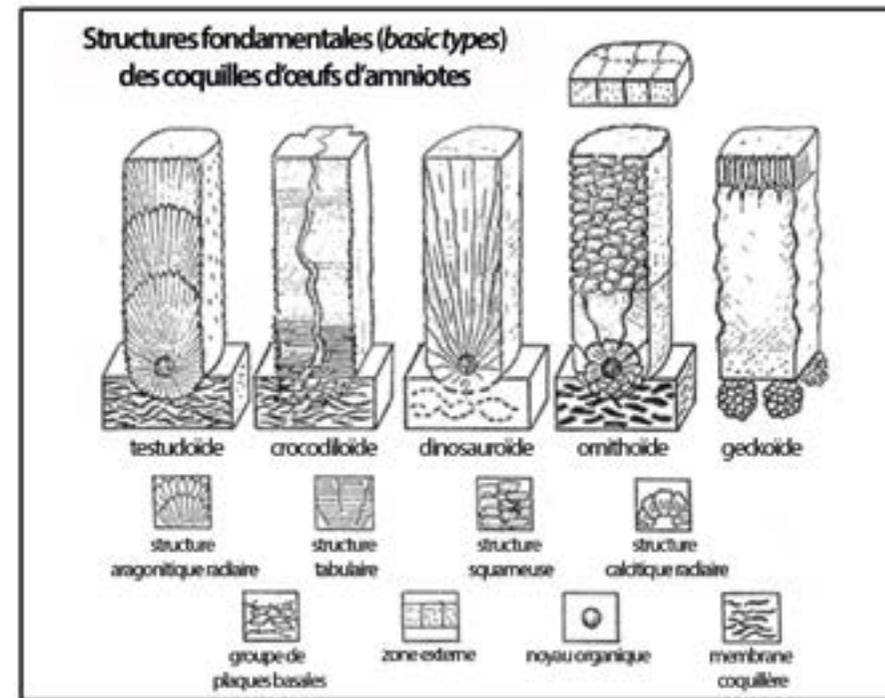


Figure 4 : Organisation des unités cristallines (vue en lumière transmise au microscope optique, et vue au microscope électronique à balayage). D'après Mikhaïlov (1991).

Caractères squelettiques	Forme et taille des œufs	Structure des coquilles
<b>Famille de dinosauriens</b>	<b>Oogenres</b>	<b>Oofamilles</b>
Oviraptoridae	Elongatoolithus	Elongatoolithidae
Troodontidae	Prismatoolithus	Prismatoolithidae
Hadrosauridae	Spheroolithus	Spheroolithidae
Titanosauria	Megaloolithus	Megaloolithidae



Photo 2 : Morphotype testudoïde : lame mince dans une coquille d'œuf de tortue éléphantine. Les cristaux sont des cristaux d'aragonite, une forme cristalline du carbonate de calcium. Chez les autres morphotypes, il s'agit de calcite.

Figure 5 : Dans quelques cas seulement, on peut faire correspondre une oo-famille (définie sur les caractéristiques de forme des œufs et sur l'arrangement et la forme des unités cristallines et des canaux qui traversent la coquille) avec une famille de dinosauriens. Il s'agit d'œufs qui contenaient des embryons suffisamment développés pour que leurs os aient été conservés, avec leurs caractéristiques qui permettent d'identifier la famille dinosaurienne à laquelle ils appartiennent. Modifié d'après Bousquet et Vianey-Liaud, 2001.

### 3.2. PRINCIPES ET MÉTHODOLOGIE

Les coquilles d'œufs sont les fossiles les plus abondants des couches bégudo-rognaciennes (c'est-à-dire campano-maastrichtiennes), beaucoup plus fréquents que ne le sont les ossements. De ce fait, il nous est apparu évident d'exploiter cette mine potentielle d'informations sur la vie dinosaurienne en Provence, en tentant de tirer toutes les informations possibles de ces fossiles. Pour ce faire, il était indispensable de traiter ces fossiles bien comme des vestiges d'anciens êtres vivants et pas seulement comme des objets minéralogiques (Vianey-Liaud, 1992).

Les investigations scientifiques sur le terrain, autour du Cengle et sur le site de Roques-Hautes ont été menées conjointement par le Muséum d'Aix-en-Provence et le laboratoire de Paléontologie de l'Université de Montpellier II. Cette collaboration avait débuté avec R. Dughi, F. Sirugue et L. Thaler à partir du milieu des années 1960. Kérourio P. y a été impliqué à la fin des années 1970 et au début des années 1980, avec B. Sigé et M. Vianey-Liaud jusqu'en 1984. Sous la direction de J.-J. Jaeger (alors Université Pierre et Marie Curie, Paris 6), Y. Dauphin et M. Penner ont ouvert un chantier parisien sur les œufs provençaux entre 1982 et 1987, tandis qu'E. Buffetaut s'intéressait aux ossements. À Montpellier, M. Vianey-Liaud et ses élèves (P. Mallan puis O. Buscaïl et enfin G. Garcia) ont repris les investigations à partir de 1989, toujours en relation avec le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, en la personne de F. Sirugue.

Les œufs de la série de Grands-Creux ont d'abord été échantillonnés partiellement par le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence et P. Kérourio, puis un premier échantillonnage est mené avec F. Sirugue, en 1991, et avec I. Cojan en octobre 1994, qui nous a guidées dans la succession des faciès sédimentaires. Dans le cadre de sa thèse sur les œufs de dinosauriens du Sud de la France, de 1995 à 1998, G. Garcia a échantillonné de façon systématique plus d'une vingtaine de coupes sédimentaires dans le bassin de d'Aix-en-Provence : la succession de Roques-Hautes Grands-Creux est la plus complète (photos 3 et 4, figures 6-8).



Photo 3 : Monique Vianey-Liaud posant dans les ravineaux au sud-ouest de l'arrachement principal, correspondant probablement à la base de la série principale. Les corrélations ouest-est sont cependant délicates, compte tenu de l'existence possible de failles, pas toujours visibles dans la végétation.



Photo 4 : Œuf de *Megaloolithus petralta* in situ, dans l'un des ravineaux.

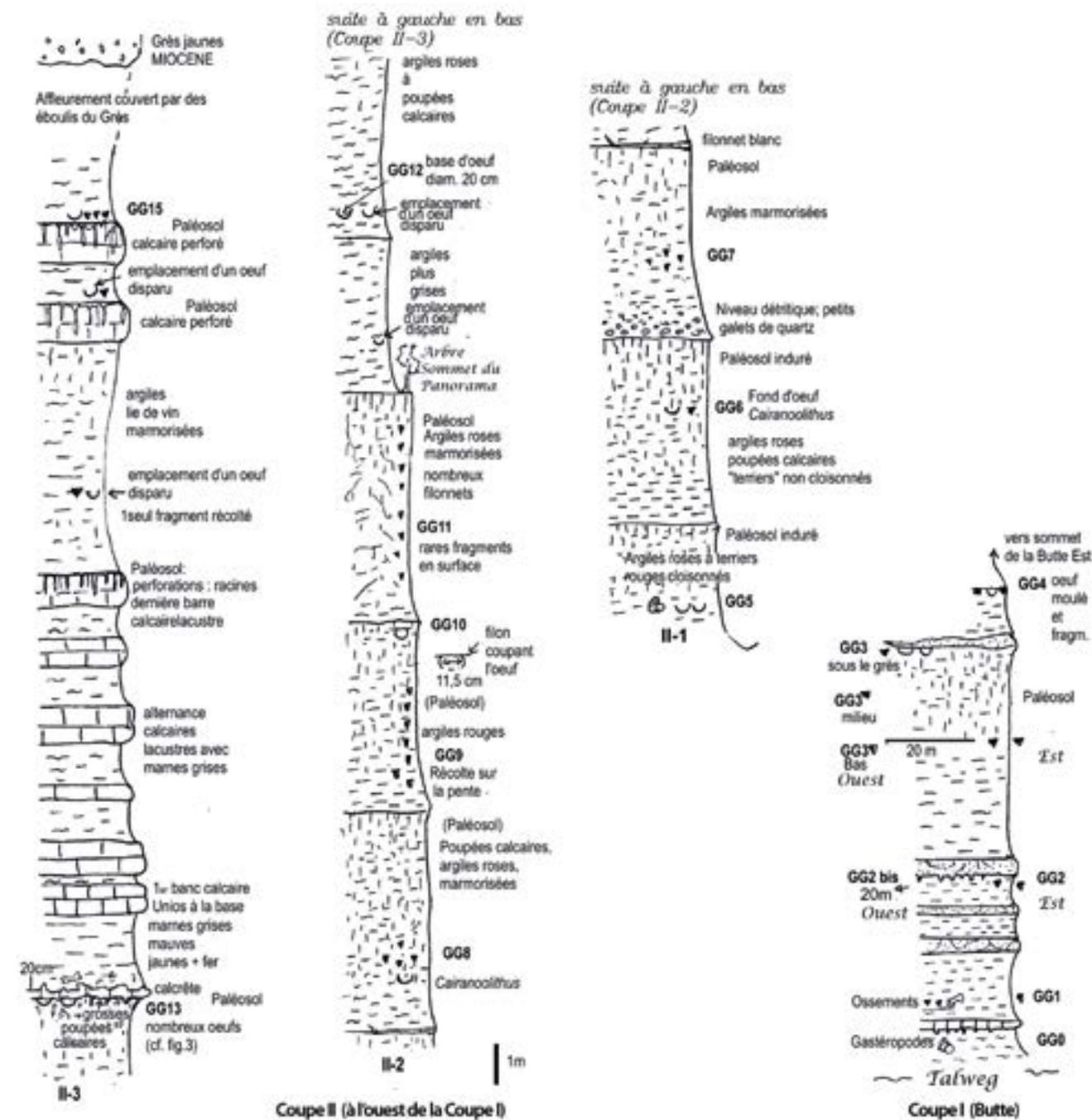


Figure 6 : Log\* de la série échantillonnée dans les Grands-Creux. Les divers prélèvements effectués en 1994 le long des coupes I et II sont indiqués de GG1 à GG15.

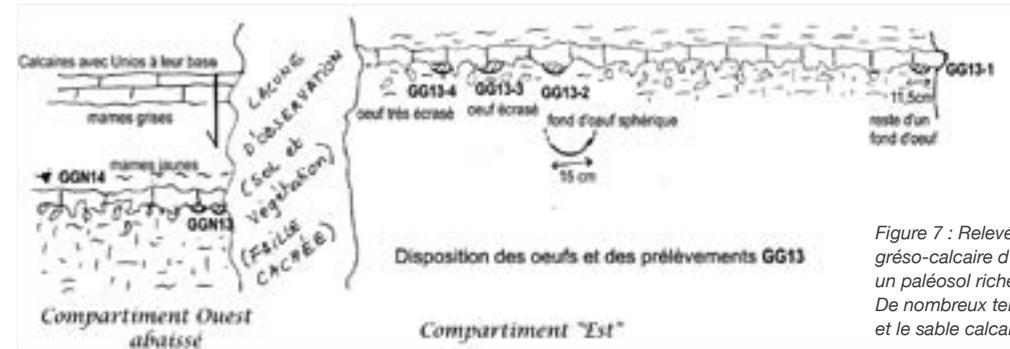


Figure 7 : Relevé effectué le long d'un niveau grésocalcaire d'épaisseur régulière ravinant un paléosol riche en œufs (GG13 à GG14). De nombreux terriers ont perforé le paléosol et le sable calcaire les a ensuite pénétrés.

## 4. PARATAXINOMIE DES COQUILLES D'ŒUFS DU SUD DE L'EUROPE OCCIDENTALE : INTÉRÊT ET DONNÉES DU SITE DE ROQUES-HAUTES

### 4.1. COUPE DE ROQUES-HAUTES

La série sédimentaire rognacienne de Roques-Hautes est constituée par la succession de 110 mètres de dépôts composés de marnes et d'argiles associées parfois à des grès. Un ensemble de bancs calcaires s'intercale en son milieu. Toutes ces couches montrent un pendage vers le nord d'environ 20°. L'ensemble est coiffé en discordance par une barre gréseuse subhorizontale d'âge Miocène.

Les relevés sédimentologiques qui ont été effectués précisément niveau par niveau le long de la coupe montrent des couches avec de nombreux horizons d'altérations et accumulations d'oxydes de fer et de carbonates, qui représentent d'anciens sols, à différents niveaux de la série (figure 7). Les dépôts d'argiles et de grès, ainsi altérés, se sont formés par accumulation et remaniement, résultant de la divagation de chenaux dans une plaine d'épandage. Les calcaires lacustres qui contiennent, pour les premiers bancs, des « moules d'eau douce », les *Unios*, correspondent à une remontée du niveau d'eau (Sittler, 1965) avec installation d'étendues d'eau plus pérennes.

Le travail engagé en 1995 sur ce site avait pour objectif de tester la biochronologie basée sur les oo-espèces, qui avait été préétablie dans l'est du synclinal de l'Arc (Vianey-Liaud *et al.*, 1994). Mais pourquoi le tester sur le site de Roques-Hautes ? Cette coupe, quasi complète qui résume les différentes séquences fluvio-lacustres décrites à l'échelle du Bassin d'Aix-en-Provence offrait un cadre idéal dans l'analyse des œufs de dinosauriens, abondants sur toute la série de dépôts. Ainsi avons-nous repéré, relevé et photographié 14 niveaux fossilifères nommés GG2 à GG15 (figure 6). Ils correspondent chacun à un prélèvement de coquilles d'œufs effectué soit directement à partir d'œufs *in situ* (isolés ou réunis en nids) soit à partir d'une concentration de fragments en surface issus d'œufs érodés.

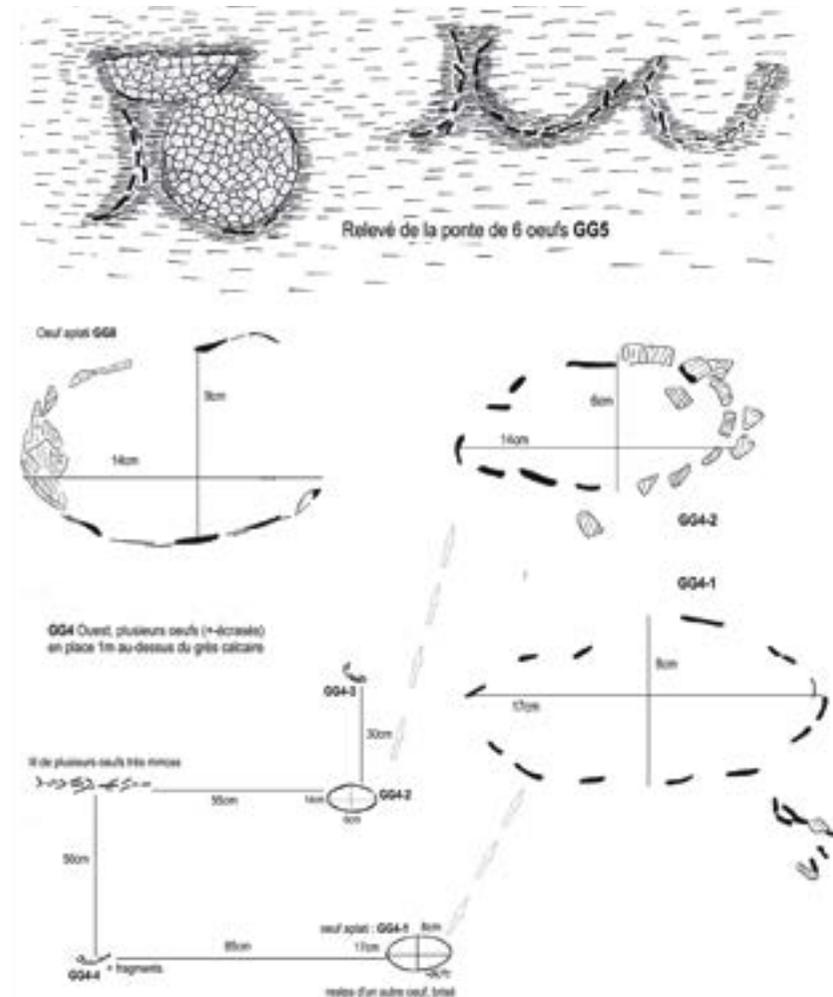


Figure 8 : Relevé de terrain d'une ponte constituée de 6 œufs à l'affleurement (GG5) à la base de la coupe II et de plusieurs œufs en GG4 en fin de coupe I (figure 6).

## 4.2. DIVERSITÉ DES ŒUFS RENCONTRÉS

De nombreuses structures de nidification ont été repérées à différents niveaux et correspondent toutes à des paquets circulaires composés de 4 à 6 œufs visibles en surface. Plusieurs œufs (par exemple GG2, GG4 et GG13) étaient situés sous des barres de grès ou de calcaires, témoignant d'une remontée du niveau de l'eau du système fluvial. Les œufs ainsi enfouis rapidement ont pu être préservés ! La découverte dans un même niveau (GG4), de deux oo-espèces (*M. « aureliensis »* et *M. petralta*) à faible distance l'une de l'autre, a permis de suggérer l'existence d'un même site de ponte, fréquenté par plusieurs groupes de dinosauriens. Le site de Roques-Hautes offrait donc les conditions environnementales requises pour que les dinosauriens puissent venir pondre régulièrement et ceci sur un laps de temps long. Cela a été également constaté pour d'autres sites tels que ceux du quartier de Sextius-Mirabeau, en centre-ville d'Aix-en-Provence (Garcia *et al.*, 2003a).

L'analyse morpho-structurale des coquilles d'œufs a permis de mettre en évidence la présence de six oo-espèces qui se succèdent le long de la coupe : *Megaloolithus « aureliensis »* (= *M. sp.*), *M. petralta*, *M. siruguei* et *M. mamillare*, ainsi que *Cairanoolithus dughii* et *Dughiolithus roussetensis*. Ce dernier a été ensuite rapporté au genre *Cairanoolithus* (Garcia et Vianey-Liaud, 2001b ; Vianey-Liaud *et al.*, 2003), tandis que les œufs identifiés comme *M. « aureliensis »* doivent être référés à une nouvelle espèce, non encore nommée (Garcia et Vianey-Liaud, 2001b). En effet, le **type\*** de *M. aureliensis* a été fondé d'abord sur des fragments de coquilles du site de Clos-la-Neuve, près de Trets. L'arrangement des unités de l'espèce de Roques-Hautes étant proche de celui du type, on avait pensé pouvoir en déduire que *M. aureliensis* avait des œufs ovoïdes, tels qu'on en trouvait à Roques-Hautes (environ 16 x 14 cm). La découverte d'œufs sphériques par E. Lorenz et A. Raffaelli dans la même couche de terrain que les fragments-type a permis de dire que les œufs *M. aureliensis* étaient sphériques (diamètre de 20 à 22 cm). Il faudra donc donner un autre nom d'oo-espèce aux petits œufs ovoïdes et à coquille mince de Roques-Hautes (figure 9 et photo 5). Par ailleurs, il n'est pas possible de considérer que les deux espèces de *Megaloolithus* de la base de la coupe de Roques-Hautes n'en font qu'une, *M. petralta*, comme le suggère A. G. Sellés (2012), la taille des œufs comme l'épaisseur et la structure des coquilles étant bien différentes (figure 10). Ceci devrait être confirmé dans le cadre des travaux issus des nouvelles fouilles sur le site. Cet exemple illustre parfaitement la démarche scientifique en paléontologie : confronter les hypothèses émises à un temps T, aux données issues de nouvelles découvertes, pour les faire évoluer.

Figure 9 : Dessins de fragments de coquilles « minces », de *Megaloolithus sp.*, en sections radiales. Les coquilles sont mal conservées, notamment les centres de cristallisation basaux sont érodés, ou bien ont disparu lors de l'éclosion. Au centre un bloc diagramme montre les reliefs de surface des unités cristallines ainsi que le trajet de quelques canaux qui s'ouvrent au niveau de petits pores. En bas, on distingue les stries d'accroissement des cristaux, ce qui n'est pas le cas pour les coquilles du haut. L'échelle représente 1 cm.

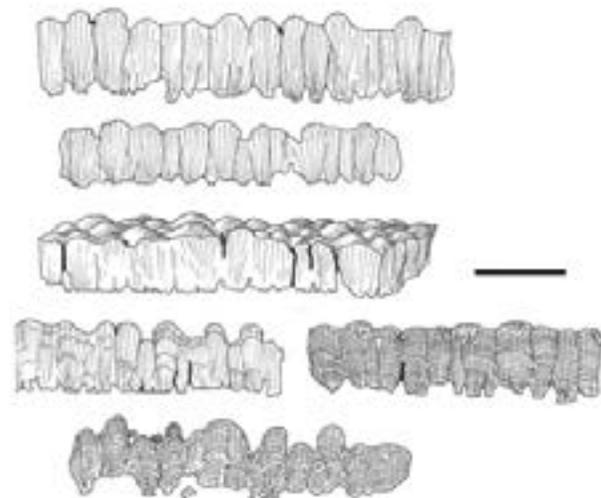


Photo 5 : Fond d'un œuf de *Megaloolithus sp.* reposant sur des fragments de coquilles minces récoltés en GG3. On devine les tubercules (nodes) marquant les différentes unités cristallines sur la surface externe des fragments.

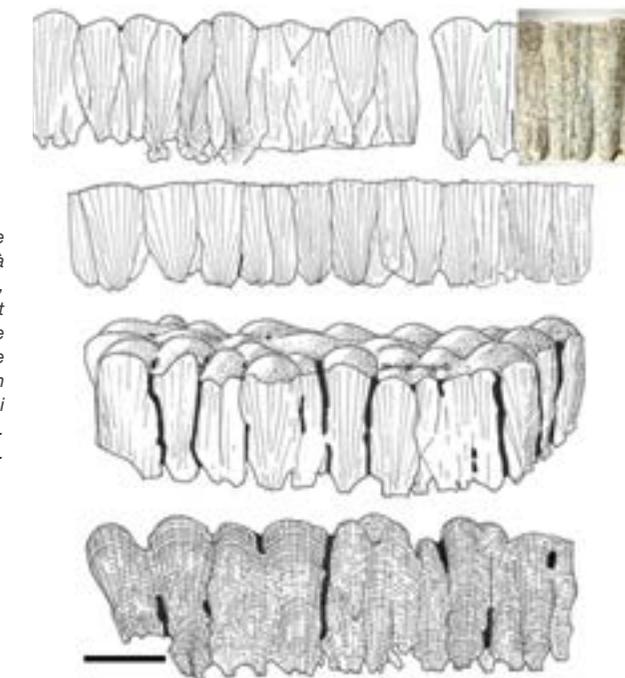


Figure 10 : Dessins de sections radiales de fragments de coquilles plus épaisses, de *Megaloolithus petralta*. Là encore, les deux rangées de coquilles sont mal conservées, notamment les centres de cristallisation basaux sont érodés. Une photo de lame mince est superposée. Le bloc diagramme montre les nodes, de plus grand diamètre que ceux de la figure 11. Sur la section radiale du bas, on distingue les stries d'accroissement des cristaux, ce qui n'est pas le cas pour la majorité des coquilles observées. L'échelle représente 1 cm.

L'identification des coquilles de Roques-Hautes a été possible malgré une recristallisation assez généralisée. Ce matériel est moins bien conservé que celui provenant des autres sites du bassin d'Aix-en-Provence. Cette différence taphonomique est étroitement liée à l'histoire géologique du site. En effet, les couches de terrain visibles à Roques-Hautes, au pied du massif de Sainte-Victoire, ont été fortement tectonisées comme l'attestent les nombreuses failles et cassures ainsi que les glissements de terrain observés sur l'affleurement. L'altération générale des échantillons, qui se traduit par des surfaces érodées et la présence sur les unités cristallines de figures de recristallisation en forme d'arêtes de hareng (*herring-bone pattern* décrit par Erben en 1970), est due en partie aux circulations de fluides induites par des contraintes mécaniques durant la diagénèse (transformation du sédiment initial en roche) mais elle est aussi liée à une forte pédogénèse (altération du sédiment par installation et évolution de sols durant une émergence).

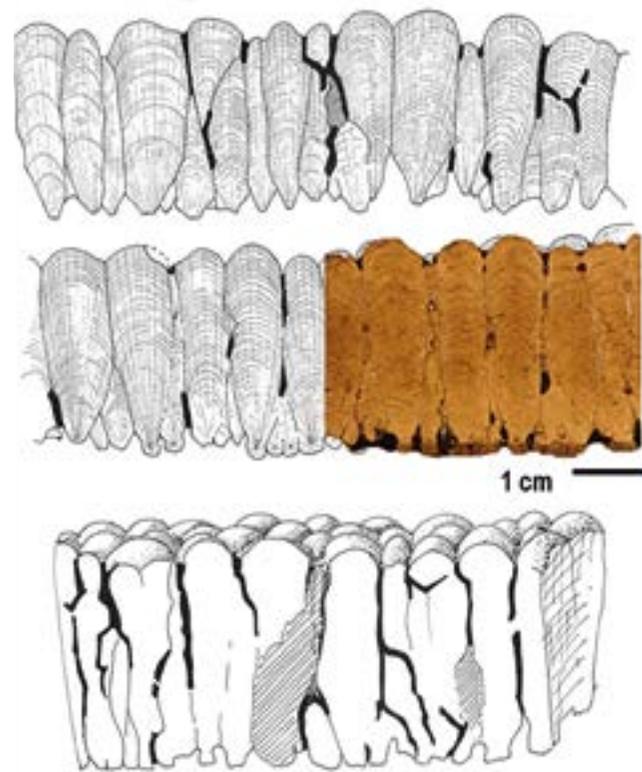


Figure 11 : Dessins de sections radiales de fragments de coquilles encore plus épaisses, de *Megaloolithus siruguei*. La lame mince du haut ainsi que le bloc diagramme montrent des canaux transverses et des canaux anastomosés. La lame mince du milieu est dessinée, à partir de sa photo (à droite).

La distribution des oo-espèces n'est pas aléatoire et des associations de taxons se succèdent stratigraphiquement le long de la coupe : ainsi la base renferme l'oo-espèce *Megaloolithus* sp. (GG2, GG3 et GG4), *M. petralta* essentiellement en GG4 et quelques fragments de *Cairanolithus dughii* (GG3). Trente mètres au-dessus, seul *C. dughii* se retrouve en grande quantité de GG5 à GG12. *M. siruguei* est aussi présent dès GG5 et devient le taxon dominant dans les niveaux GG7 à 9 (figure 11). En GG1, un faible pourcentage de *Megaloolithus* sp. (7%) a été décelé. Les dernières séries avant les couches calcaires (GG10, GG11 et GG13) contiennent surtout *C. roussetensis*. *M. mamillare* n'est présent que dans les niveaux après ces calcaires lacustres (GG15) (Tableau 1).

1995 (1994)	OOGENRES OOSPÈCES	
GG1 (A)	<i>Megaloolithus</i> sp. (= <i>M. aureliensis</i> 1994)	<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG2 (B)	<i>Megaloolithus</i> sp. (= <i>M. aureliensis</i> 1994)	<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG3	<i>Megaloolithus</i> sp. (= <i>M. aureliensis</i> 1994)	<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG4 (D)	<i>Megaloolithus</i> sp. (= <i>M. aureliensis</i> 1994)	<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG5		<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994 <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG6		<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994 <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG7		<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994 <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG8		<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994 <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG9		<i>Megaloolithus petralta</i> Vianey-Liaud et al. 1994 <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG10		<i>Cairanolithus roussetensis</i> (Garcia et Vianey-Liaud 2001b) <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG11	<i>Megaloolithus</i> sp. indet.	<i>Cairanolithus roussetensis</i> (Garcia et Vianey-Liaud 2001b) <i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG12		<i>Cairanolithus dughii</i> Vianey-Liaud et al. 1994
GG13		<i>Cairanolithus roussetensis</i> (Garcia et Vianey-Liaud 2001b)
GG14		
GG15	<i>Megaloolithus mamillare</i> Vianey-Liaud et al. 1994	

Tableau 1 : Répartition stratigraphique des oo-genres et oo-espèces dans les différentes couches fossilifères des Grands-Creux étudiées en 1994 (entre parenthèses) et 1995.

La plupart de ces oo-taxons appartiennent à la famille des mégaloolithidés qui désigne les gros œufs sphériques à coquilles tuberculées (Vianey-Liaud *et al.*, 1994). Elle comporte, outre les oo-espèces *Megaloolithus* sp., *M. petralta*, *M. siruguei* et *M. mamillare*, les oo-espèces *M. baghensis* (anciennement *M. pseudomamillare* Vianey-Liaud *et al.*, 2003) et *M. microtuberculata* (Garcia et Vianey-Liaud, 2001b) et neuf autres taxons décrits en Argentine, au Maghreb et en Inde (Vianey-Liaud et Garcia, 2003 ; Vianey-Liaud *et al.*, 2003 ; Garcia *et al.*, 2003b ; Jackson *et al.*, 2008 ; Grellet-Tinner *et al.*, 2004, 2006, 2012 ; Grellet-Tinner et Fiorelli 2010). Cette oo-famille est classiquement attribuée aux dinosaures sauropodes titanosauriens (Chiappe *et al.*, 1998), même si cette identification ne fait pas consensus en l'absence d'œufs embryonnés (Grigorescu *et al.*, 2010). Par contre l'affiliation est confirmée pour des œufs d'Auca Nuevo, en Argentine, dans la mesure où les embryons ont été conservés dans des œufs dont la coquille est de structure mégaloolithidée. Les deux autres espèces de *Cairanoolithus*, présentes sur Roques-Hautes ont été récemment reconsidérées comme appartenant à une nouvelle famille d'œuf : les cairanoolithidés. Une équipe espagnole les ont rapprochés récemment des ornithopodes basaux et même des ankylosauriens nodosauridés (Sellés et Galobart, 2015), ce qui reste à confirmer.

### 4.3. BIOSTRATIGRAPHIE ET INTÉRÊT POUR LES CORRÉLATIONS À L'ÉCHELLE DES AUTRES BASSINS CONTEMPORAINS DU SUD DE L'EUROPE

Les données obtenues sur les œufs de Roques-Hautes ont servi de base aux développements menés par la suite sur la biostratigraphie des œufs, à l'échelle du bassin d'Aix-en-Provence d'une part, mais aussi des autres bassins contemporains français (bassin de Villeveyrac-Mèze (Garcia *et al.*, 2000b), chaînon de Saint-Chinian (Garcia et Valentin, 2002), bassin sous pyrénéen comprenant les Corbières, le Plantaurel et les petites Pyrénées) et espagnols (bassin de Tremp, les synclinaux d'Ager et Vallcebre). La succession des oo-espèces est la même dans toutes les coupes effectuées en Provence, la succession de Roques-Hautes étant la plus complète sur une même verticale. Sur cette base, nous avons pu établir que les différentes formations calcaires intercalées dans des marnes et des grès depuis Vitrolles jusqu'à Sainte-Victoire, avec des épaisseurs variables (d'une dizaine à une cinquantaine de mètres) ne sont pas toutes isochrones et ne peuvent pas servir de repère stratigraphique de référence. En réalité, comme la succession des oo-espèces nous l'a montré, ces formations sont diachroniques de l'est (Vitrolles, Rognac) à l'ouest (Rousset, Sainte-Victoire) du bassin d'Aix-en-Provence notamment (Garcia et Vianey-Liaud, 2001a).

La succession des oo-espèces se retrouve aussi dans le bassin de Tremp au Sud des Pyrénées (Vila *et al.*, 2011), ce qui confirme les oo-taxons comme marqueurs stratigraphiques dans un bassin sédimentaire donné.

## 5. EN GUISE DE CONCLUSION, PROVISOIRE...

La fin du 20<sup>e</sup> siècle et le tout début du 21<sup>e</sup> ont connu une avancée majeure dans la connaissance des œufs de dinosaures provençaux, et le site de Roques-Hautes y a pris toute sa part. Les œufs fossilisés de Roques-Hautes ont largement été mis à contribution, d'une part dans la définition et la caractérisation des différentes oo-espèces et, d'autre part, dans l'établissement de la succession des différents oo-taxons de la fin du Campanien et du Maastrichtien. De ce fait ils ont contribué à la robustesse de la biostratigraphie oo-dinosaurienne et fourni des marqueurs du temps valables au moins à l'échelle de l'Europe Occidentale (Vila *et al.*, 2011), sinon eurasiatique (Vianey-Liaud *et al.*, 2003).

La tâche était grande, les moyens limités et les chercheurs peu nombreux pour effectuer le travail de fourmi nécessaire, de la prospection et la récolte jusqu'au travail en laboratoire (dégagement, préparation, confection de lames minces, analyses physiques et chimiques, observations au microscope électronique, mesures et analyses statistiques, comparaisons et descriptions, etc...). Il est clair que, faute de temps, de bras et de moyens, ce travail a dû laisser de côté d'autres aspects moins immédiatement exploitables, comme l'analyse des modes de ponte des différents oo-taxons. Ceci aurait nécessité des fouilles ciblées et de plus grande ampleur, que nous ne pouvions entreprendre alors. Par ailleurs, compte tenu du pendage des couches (20°), les fouilles dites « archéologiques », c'est-à-dire sur des plans horizontaux, menées parfois (Cousin, 2002), ne pouvaient que donner des résultats décevants et discutables. Dans le cadre de la valorisation scientifique de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, sous la houlette du Département des Bouches-du-Rhône en collaboration avec le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, cette problématique jusque-là mise en attente, pourra être abordée à l'issue des fouilles en cours.

## BIBLIOGRAPHIE

- Alvarez L. W., Alvarez W., Asaro F. et Michel H. V. (1980). Extra-terrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science* 208 : 1095-1108.
- Ashraf A. R. et Erben, H. K. (1986). Palynologische Untersuchungen an der Kreide-Tertiär Grenze west-mediterraner Regionen. *Paläontographica B* 200 : 111-163.
- Babinot, J.F., Durand, J.P. 1980. Les étages Français et leurs stratotypes (Valdonnien, Fuvélien, Bégudien, Rognacien). *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, 109 : 171-188.
- Bousquet J.-C. et Vianey-Liaud M. (2001) *Dinosaures et autres reptiles du Languedoc*. Les Presses du Languedoc, 200 p.
- Buscail O. (1991). *Analyse de la matière organique de coquilles d'œufs de dinosaures du Sud de la France*. Mémoire de DEA de l'Université Montpellier II.
- Chiappe L.M., Coria R.A., Dingus L., Jackson F., Chinsam Y.A., Fox M. 1998. Sauropod dinosaur embryos from the Late Cretaceous of Patagonia, *Nature* 396: 258-261.
- Cojan I. (1989). Discontinuités majeures en milieu continental. Proposition de corrélation avec des événements globaux (Bassin de Provence, S. France, Passage Crétacé/Tertiaire), *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 309 : 1013-1018.
- Cojan I., Renard M. et Emmanuel L. (2003). Palaeoenvironmental reconstruction of dinosaur nesting sites based on a geochemical approach of eggshells and associated palaeosols, Maastrichtian, Provence Basin, France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 191 : 111-138.
- Cojan, I. et Moreau, M.-G. (2006). Correlation of terrestrial climatic fluctuations with global signals during the upper Cretaceous/Danian in a compressive setting (Provence, France). *Journal of Sedimentary Research* 76 : 589-604.
- Cousin R. (2002). Organisation des pontes de dinosauriens de la para-famille des Megaloolithidae Zhao, 1979, *Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre* 89 : 1-177.
- Cousin R., Breton G., Fournier R. et Watté J.-P. (1994). Dinosaur egg-laying and nesting in France. *In : Dinosaur's eggs and babies*, Carpenter K., Hirsch H. F. et Horner J. (Eds), Cambridge University Press : 56-74.
- Dauphin Y. (1990). Comparative microstructural studies of eggshells. Dinosaurs of the Southern France. *Revue de Paléobiologie* 9, 1 : 121-137.
- Dauphin Y. (1992). Microstructure et composition chimique des coquilles d'œufs d'oiseaux et de reptiles, *Paläontographica A* 223 : 1-17.
- Dauphin, Y. (1994). Incidence de la méthode d'analyse sur la composition chimique des coquilles d'œufs pathologiques du bassin d'Aix-en-Provence. *Annales de Paléontologie* 77 : 107-122.
- Dauphin Y. et Jaeger J.-J. (1991). Implications de l'analyse microstructurale et géochimique des œufs de dinosaures de La Cairanne (bassin d'Aix-en-Provence, France, Rognacien inférieur). *Paläontographica Z. Stuttgart* 65 : 391-404.
- Dughi R. et Sirugue F. (1957). Les œufs de dinosauriens du bassin d'Aix-en-Provence, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 245 : 707-710.
- Dughi R., Sirugue F. (1958). Observations sur les œufs de dinosaures du bassin d'Aix-en-Provence: les œufs à coquilles bistratifiées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 246 : 2271-2274.
- Dughi R. et Sirugue F. (1962). Distribution verticale des œufs d'oiseaux fossiles de l'Eocène de Basse Provence, *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 : 69-78.
- Erben H. K. (1970). Ultrastrukturen und Mineralisation rezenter und fossiler Eischalen bei Voegeln und Reptilien. *Biomérisation* 1 : 1-66.
- Erben, H. K., Hoefs J., Wedepohl K. H. (1979). Paleobiological and isotopic studies of eggshells from a declining dinosaur species. *Paleobiology* 5 : 380-414.
- Garcia G. (1995). *Les coquilles d'œufs de dinosaures de la coupe de Roquehautes Grands Creux (Bassin d'Aix-en-Provence) : diversité et applications biochronologiques*. Mémoire de DEA de l'Université Montpellier II.
- Garcia G. (1998). *Les coquilles d'œufs de dinosaures du crétacé supérieur du sud de la France : diversité, paléobiologie, biochronologie et paléoenvironnements*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier, 153 p.
- Garcia G. (2000). Diversité des coquilles « minces » d'œufs fossiles du Crétacé supérieur du sud de la France, *Géobios* 33 (1) : 113-126.
- Garcia G. et Vianey-Liaud M. (2000). Les œufs de dinosaures du bassin d'Aix. *In : Dinosaures en Provence*, Cheylan G. et Garcia G. (Eds.), 2<sup>e</sup> édition, Édisud, Aix-en-Provence : 46-53.
- Garcia G., Duffaud S., Feist M., Marandat B., Tambareau Y., Vilatte J. et Sigé B. (2000a). La Neuve, gisement à plantes, invertébrés et vertébrés du Sénonien supérieur continental (Bégudien) du bassin d'Aix-en-Provence. *Géodiversitas* 22 (3) : 325-348.
- Garcia G., Feist M., Cabot A., Valentin X. et Vianey-Liaud M. (2000b). Les œufs de dinosaures du Crétacé supérieur du Bassin de Villeveyrac-Mèze (Hérault, France): description d'une nouvelle oo-espèce de *Prismatoolithus*. *Bulletin de la Société Géologique de France* 171, 3 : 283-289.
- Garcia G. et Vianey-Liaud M. (2001a). Dinosaur eggshells as new biochronological markers in Late Cretaceous continental deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 169 : 153-164.
- Garcia G., Vianey-Liaud M. (2001b). Nouvelles données sur les coquilles d'œufs de dinosaures de Megaloolithidae du sud de la France : systématique et variabilité intraspécifique. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 332 : 185-191.
- Garcia G. et Valentin X. (2002). Les restes d'œufs de dinosaures dans les séries continentales du Chaînon de Saint-Chinian (Crétacé supérieur, 80-70 Ma). *Bulletin de la Société Sciences Naturelles de Béziers*, XIX (60) : 11-16.
- Garcia G., Dutour Y., Cojan I., Valentin X., Cheylan G. (2003a). Long term fidelity of megaloolithid egg-layers to a large breeding-ground in the Upper Cretaceous of Aix-en-Provence (southern France). *Palaeovertebrata* 32 : 109-120.
- Garcia G., Tabuce R., Cappetta H., Marandat B., Bentaleb I., Benabdallah A. et Vianey-Liaud M. (2003b). First record dinosaur eggshells and teeth from the North-West African Maastrichtian (Morocco). *Palaeovertebrata* 32 : 59-69.
- Gervais P. (1877). De la structure de coquilles calcaires d'œufs et des caractères que l'on peut en tirer, *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 84 : 159-165.

- Gradstein F., Ogg J., Schmitz M. et Ogg G. (2012). *The geologic time scale 2012*. Elsevier Science Ltd, 1176 p.
- Grellet-Tinner G., Chiappe L. M. et Coria R. (2004). Eggs of titanosaurid sauropods from the Upper Cretaceous of Auca Mahuevo (Argentina). *Canadian Journal of Earth Sciences* 41 : 949-960.
- Grellet-Tinner G., Chiappe L. M., Norell M. et Bottjer D. (2006). Dinosaur eggs and nesting behaviors: A paleobiological investigation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232 : 294-321.
- Grellet-Tinner G. et Fiorelli L. E. (2010). A new Argentinean nesting site showing neosauropod dinosaur reproduction in a Cretaceous hydrothermal environment. *Nature Communications* 1 : 32.
- Grellet-Tinner G., Fiorelli L. E. et Salvador R. B. (2012). Water vapor conductance of the Lower Cretaceous Dinosaurian eggs from Sanagasta, La Rioja, Argentina : Paleobiological and paleoecological implications for south American Faveoolithid and Megalolithid eggs. *Palaios* 27: 35-47.
- Grigorescu D., Garcia G., Codrea V., Bojar A.-V. et Csiki, Z. (2010). Nesting behavior of the Maastrichtian Megalolithidae eggs from the Hațeg Basin, Romania and reconstruction of their paleoenvironment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 293, 360-374.
- Hansen H. J., Gwozdz R., Rasmussen K. L. (1989). The continental Cretaceous/Tertiary boundary in the Aix en Provence Basin, South France. A preliminary paleomagnetic study. La limite Crétacé-Tertiaire dans le synclinal de l'Arc. *Cahiers de la Réserve géologique de Haute Provence* n° 1 : 43-50.
- Hirsch, K. F. (1989). Interpretations of Cretaceous and pre-Cretaceous eggs and shells fragments. In : *Dinosaur Tracks and Traces*, Gillette D. D. et Lockey M. G. (Eds.), Cambridge University Press, New York : 89-97.
- Hirsch K. F. (1994). Late Jurassic eggshells from the Western Interior of North America. In : *Dinosaur Eggs and Babies*, Carpenter K., Hirsch K. et Horner J. R. (Eds.), Cambridge University Press, New York : 137-150.
- Hirsch, K. (1996). Parataxonomic classification of fossil Chelonian and Gecko eggs. *Journal of Vertebrate Paleontology* 16 (4) : 752-762.
- Hirsch K. F. et Packard M. J. (1987). Review of fossil eggs and their shell structure. *Scanning Microscopy* 1 : 383-400.
- Hirsch K. F. et Quinn B. (1990). Eggs and eggshell fragments from the Upper Cretaceous Two Medicine Formation of Montana. *Journal of Vertebrate Paleontology* 10 (4) : 491-511.
- Jackson F. D., Varricchio R. A., Jackson R. A., Vila B. et Chiappe L. M. (2008). Comparison of water vapor conductance in a titanosaur egg from the Upper Cretaceous of Argentina and a *Megalolithus siruguei* egg from Spain. *Paleobiology* 34 : 229-246.
- Jaeger J.-J. et Westphal M. (1989). La limite Crétacé-Tertiaire dans le bassin de l'Arc (Sud-Est, France). *Cahiers de la réserve Géologique de Haute Provence* n°1, 50p.
- Kérourio P. (1981). La distribution des « Coquilles d'œufs de Dinosauriens multistratifiées » dans le Maestrichtien continental du Sud de la France. *Géobios* 14 : 533-536.
- Kérourio P. (1982). Un nouveau type de coquille présumé Dinosaurien dans le Campanien et le Maastrichtien continental de Provence. *Palaeovertebrata* 12 : 141-147.
- Kohring R. (1999) Strukturen, biostratonomie, systematische und phylogenetische relevanz von Eischalen amnioter wirbeltiere. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg* 210 : 1-307.
- Mallan P. (1990). *Étude des coquilles d'œufs de dinosaures du bassin d'Aix-en-Provence (France) : microstructure et matière organique*. Mémoire de DEA de l'Université de Montpellier II : 1-37.
- Marin F. et Dauphin Y. (1991). Composition de la phase protéique soluble des coquilles d'œufs de dinosaures du Rognacien (Crétacé) du Sud-Est de la France. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* 4 : 243-255.
- Médus J. (1972). Palynological zonation of the upper Cretaceous in southern France and northeastern Spain. *Revue de Paléobotanique et de Palynologie* 14 : 287-295.
- Médus J., Colombo F. et Durand J.-P. (1992). Pollen and spore assemblages of the uppermost Cretaceous continental formations of southeastern France and north-eastern Spain, *Cretaceous Research* 13 : 119-132.
- Matheron P. (1869a). Notice sur les Reptiles fossiles des dépôts fluvio-lacustres crétacés du bassin à lignite de Fuveau. *Mémoire de l'Académie impériale des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Marseille*, 39 p.
- Matheron P. (1869b). Note sur les Reptiles fossiles des dépôts fluvio-lacustres crétacés du bassin à lignite de Fuveau. *Bulletin de la Société géologique de France* 26 (2) : 781-795.
- Matheron, P. 1878-1880. *Recherches paléontologiques dans le Midi de la France*. Ouvrage inachevé conservé au Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille.
- Mikhaïlov K. E. (1987). Some aspects of the structure of the shell of the egg, *Paleontological Journal* 21 : 54-61.
- Mikhaïlov K. E. (1991). Classification of fossil eggshells of amniotic vertebrates. *Acta Paleontologica Polonica* 36 : 193-238.
- Mikhaïlov K. E. (1992). The microstructure of avian and dinosaurian eggshell: phylogenetic implications. *Natural History Museum of Los Angeles County* 38 : 361-373.
- Mikhaïlov K. E. (1994). Theropod and Protoceratopsian Dinosaur Eggs from the Cretaceous of Mongolia and Kazakhstan. *Paleontological journal* 28 (2) : 101-120.
- Mikhaïlov K. E. (1997). Fossil and recent eggshell in amniotic vertebrates: fine structure, comparative morphology and classification. *Special Papers in Palaeontology* 56 : 1-80.
- Mikhaïlov K. E., Bray E.S. et Hirsch K E. (1996). Parataxonomy of fossil egg remains (*Veterovata*): principles and applications. *Journal of Vertebrate Paleontology* 16 (4) : 763-769.
- Penner M. M. (1983). Contribution à l'étude de la microstructure des coquilles d'œufs de dinosaures du Crétacé supérieur dans le bassin d'Aix-en-Provence (France) : Application Biostratigraphique. *Mémoire des Sciences de la Terre* 83 : 1-234.
- Penner, M. M. (1985). The problem of dinosaur extinction. Contribution of the study of terminal Cretaceous eggshells from Southeast France. *Géobios* 18 : 665-669.
- Sellés A. G. et Galobart A. (2015). Reassessing the endemic European Upper Cretaceous dinosaur egg *Cairanoolithus*. *Historical Biology* 28 (5) : 583-596.
- Sittler C. (1965). The fluvio-lacustrine minerological environmental at the Cretaceous tertiary boundary in the Aix-en-Provence basin. *Cahiers de la Réserve Géologique de Haute-Provence* N°1 : 11-15.

- Taquet P. (2001). Philippe Matheron et Paul Gervais : deux pionniers de la découverte et de l'étude des os et des œufs de dinosaures de Provence (France). *Géodiversitas* 23 (4) : 611-623.
- Valentin X., Godefroit P., Tabuce R., Vianey-Liaud M., Wu W. et Garcia G. (2012). First Maastrichtian vertebrate assemblage from Provence (Vitrolles-La-Plaine, France). In : *Bernissart Dinosaurs and Early Cretaceous Terrestrial Ecosystems*, Godefroit P. (Ed.), Indiana University Press : 583-597.
- Vianey-Liaud M. (1992). Les coquilles d'œufs de Dinosaures sortent de l'anonymat. *La Recherche* 23 : 1062-1064.
- Vianey-Liaud M. (1994). Les œufs de dinosaures du bassin d'Aix. In : *Dinosaures en Provence*, Cheylan, G. (ed.), Les cahiers de Sainte Victoire N°1, Edisud, Aix-en-Provence : 46-52.
- Vianey-Liaud M. (2003). Second international symposium on dinosaur eggs and babies. *Palæovertebrata* 32 : 71-76.
- Vianey-Liaud M., Mallan P., Buscaill O. et Montgelard C. (1994). Review of French dinosaur eggshells: morphology, structure, mineral, and organic composition. In : *Dinosaur Eggs and Babies*, Carpenter K., Hirsch K. et Horner, J.R. (eds). Cambridge University Press.
- Vianey-Liaud M. et Garcia G. (2003). Diversity among North African dinosaur eggshells. *Palæovertebrata* 32 : 59-69.
- Vianey-Liaud M., Khosla A. et Garcia G. (2003). Indian and European dinosaur eggshell relationships: paleogeographical implications. *Journal of Vertebrate Paleontology* 23 (3) : 575-585.
- Vianey-Liaud M. et Zelenitsky D. (2003). Historical and new perspectives on the parataxonomy of fossil eggs. *Palæovertebrata* 32 (2-4) : 189-195.
- Vila B., Riera V., Bravo A. M., Oms O., Vicens E. et Estrada R. (2011). The chronology of dinosaur oospecies in south-western Europe: Refinements from the Maastrichtian succession of the eastern Pyrenees. *Cretaceous Research* 32 (3) :378-386.
- Villot, L. (1883). Etude sur la Bassin de Fuveau et sur un grand travail à y exécuter. *Annales des Mines* 3 : 5-66.
- Voss-Foucart, M. F. (1968). Paléoprotéines des coquilles d'œufs fossiles de dinosauriens du Crétacé supérieur de Provence. *Comparative Biochemistry and Physiology* 24 : 1-36.
- Young C. C. (1954). Fossil reptilian egg from Layiang, Shantung, China. *Scientia Sinica* 3: 505-522.
- Young C. C. (1965). Fossil eggs from Nanshiung Kwangtung and Kanchou Kiangsi. *Vertebrata PalAsiatica* 9 : 141-170.
- Zhao Z. (1975). The microstructure of the dinosaur eggshells of Nanshiung, Kwantung, *Vertebrata PalAsiatica* 13 : 105-117.
- Zhao, Z. (1979). The advancement of researches on the dinosaurian eggs in China. In : *South China Mesozoic and Cenozoic « Red Formation »*. Beijing, Science Publishing Co.: 329-340.
- Zhao Z. (1994) Dinosaur eggs in China: On the structure and evolution of eggshells. In : *Dinosaur Eggs and Babies*, Carpenter K., Hirsch K. et Horner J. R. (Eds). Cambridge University Press, New York. : 184-203.
- Zhao Z., Ye J., Li H., Zhao Z. et Yan Z. (1991). Extinction of the dinosaurs across the Cretaceous-Tertiary boundary in Nanxiong Basin, Guandong Province. *Vertebrata PalAsiatica* 29 : 1-20.



Fragments de coquilles d'œufs fossilisés collectés dans les Grands-Creux et ayant servi de matériel d'étude (voir figure 6) (photo T. Tortosa, 2021).



© Gilles Cheylan

## THIERRY TORTOSA

Conservateur de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, Département des Bouches-du-Rhône, Hôtel du Département, 52 avenue Saint-Just 13256 Marseille.

## ÉRIC BUFFETAUT

Directeur de recherche émérite au CNRS (UMR 3853), Laboratoire de Géologie de l'École Normale Supérieure, PSL Research University, 24 rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

### Mots-clés :

Paléontologie,  
Ossements de dinosauriens,  
Collections,  
Crétacé supérieur,  
Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

Article reçu le 8 septembre 2019  
Article accepté le 29 mai 2020

# RÉSERVE NATURELLE DE SAINTE-VICTOIRE : SOUS LES OEUFS, DES OS DE DINOSAURIENS

THIERRY TORTOSA & ÉRIC BUFFETAUT

### Résumé :

Les dinosauriens de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire sont surtout représentés par la découverte de leurs œufs depuis les années 1940. Cependant, des ossements furent également mis au jour à la fin des années 1980, quelques années avant le classement du territoire en réserve naturelle nationale. Cet article fait le point sur l'histoire des découvertes d'ossements fossilisés sur le territoire avec, notamment, *Variraptor mechinorum*. Puis, sont présentés les résultats des premières fouilles méthodiques menées par le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence dans les années 2010. L'ensemble des restes osseux collectés est attribué à trois taxons, scientifiquement publiés ou non : *Variraptor*, *Rhabdodon* et un titanosaurien indéterminé. Ces dinosauriens sont décrits de manière détaillée et sont comparés aux autres représentants de leurs familles respectives. Ces descriptions anatomiques sont accompagnées d'anecdotes et présentent les implications scientifiques liées à leur découverte vis-à-vis des autres spécimens connus en Provence ou des autres régions fossilifères du Sud de l'Europe.

### Abstract :

Dinosaurs from the Réserve Naturelle de Sainte-Victoire are mainly represented by the discoveries of their eggs since the 1940s. However, fossilized bones were also brought to light at the end of the 1980s, a few years before the designation of the territory as a national natural reserve. This article reviews the history of the discoveries of fossil bones on the territory of the reserve, including those of *Variraptor mechinorum*. Then, the results of the first systematic excavations conducted by the Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence in the 2010s are presented. The whole of the collected remains are attributed to three taxa, scientifically published or not: *Variraptor*, *Rhabdodon* and an indeterminate titanosaur. These dinosaurs are described in detail and are compared with other representatives of their respective families. These anatomical descriptions are complemented by anecdotes and present the scientific implications linked to their discovery, with respect to the other specimens known in Provence or the other fossiliferous regions of southern Europe.

## 1. INTRODUCTION : LES PREMIÈRES DÉCOUVERTES DE DINOSAURIENS SUR LA RÉSERVE NATURELLE

Les premières recherches sur les vertébrés provençaux datent du milieu du 19<sup>e</sup> siècle et ont largement été initiées par le géologue et agent voyer Philippe Matheron (Matheron, 1847, 1869a, 1869b, 1878-1880, 1891). Aussi surprenant que cela puisse paraître, l'histoire des découvertes des ossements de dinosauriens en Provence est aussi ancienne que celle de leurs œufs fossilisés, voire plus ancienne (encart 1). En effet, Matheron (1869b) proposait dans la même publication la description du premier dinosaurien local, *Rhabdodon*, celle du « saurien gigantesque » « *Hypselosaurus* » (qui sera attribué à un **sauropode\*** **titanosaurien\*** par Depéret en 1900), puis la description du premier fossile d'un œuf de grande taille. Cependant, les recherches d'ossements de ces grands reptiles du Mésozoïque ne connurent pas l'engouement vécu aux Etats-Unis et tombèrent quelque peu dans l'oubli durant un siècle jusqu'à la publication des travaux synthétiques de Lapparent (1947). C'est à cette date que le site de Roques-Hautes est mentionné pour la première fois, suite à la découverte de coquilles d'œufs attribués aux dinosauriens. La réputation de ce site devint mondiale pour la richesse, la diversité et l'incroyable qualité de conservation des œufs et nids fossilisés.

L'effort de recherche mené par les conservateurs du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (MHNA) dans les années 1950-80 (chapitre 4), puis par les universitaires de Montpellier dans les années 1990-2000 (chapitre 5) a largement contribué à cette renommée. Contre toute attente, l'étude des ossements de dinosauriens demeura timide et très marginale sur ce secteur géographique. En effet, les premières mentions scientifiques de restes de dinosauriens dans le secteur de Roques-Hautes datent des années 1990, alors que des fragments osseux étaient connus dès la fin des années 1950 (figure 1A). Ce contraste d'étude entre œufs et ossements est d'autant plus curieux que les couches fossilifères bégudo-rognaciennes sont de mêmes faciès et richesse que celles présentes dans d'autres bassins sédimentaires provençaux (bassin d'Aix-en-Provence et synclinal de Montmeyan-Fox-Amphoux) où des ossements de dinosauriens étaient formellement identifiés dès la fin du 19<sup>e</sup> siècle (Matheron, 1869b, 1891 ; Depéret 1900). Malgré de nombreux prélèvements de fossiles fragmentaires effectués par F. Dughi et R. Sirugue, parfois après tentatives de lavages-tamisages, les découvertes du MHNA ne furent qu'anecdotiques et n'apportent aujourd'hui qu'une indication historique.

Il est à noter qu'un certain nombre de localités (des « points ») à débris d'ossements furent recensés sur les secteurs de Roques-Hautes et des Grands-Creux (figure 1A-B) mais aucune référence géographique précise n'a pour l'instant été retrouvée dans les archives du MHNA. Dans les années 1980, P. Kérourio entame des recherches sur les œufs de dinosauriens. Intégrant par la suite le MHNA, il mena de nombreuses prospections dans le secteur de Roques-Hautes durant lesquelles quelques fragments d'os furent collectés (figure 1E). Là encore, l'intérêt des découvertes reste anecdotique compte tenu de la nature très fragmentaire de ses collectes.

Actuellement, sept collections comportant des restes de dinosauriens sont connues :

- La « **Collection Dughi-Sirugue** » (collection institutionnelle du MHNA), constituée d'éléments collectés lors de multiples visites sur les secteurs des Grands-Creux, de Roques-Hautes et du Champ de Tir. Parmi ces ossements, seules deux dents de *Rhabdodon* sont formellement identifiées, dont une très fragmentaire (figures 1B et D).
- La « **Collection Martin** » (collection privée, Vitrolles), constituée d'une dent de *Rhabdodon* découverte en 1972 lors d'une prospection menée en compagnie de F. Sirugue et M. Martin du MHNA. Un fragment de fémur de titanosaurien aurait également été découvert mais il n'apparaît dans aucune collection. Seule la dent est toujours conservée mais elle n'a pas encore pu être observée directement (figure 1F).

- La « **Collection Kérourio** » (collection institutionnelle du MHNA), constituée de nombreux fragments collectés dans les années 1980 sur les secteurs des Grands-Creux, Roques-Hautes et du Champ de Tir (figure 1C). Cette collection inclut notamment un fragment de potentiel **tibia\*** de *Rhabdodon* et quelques débris de vertèbres de gros reptiles (*Rhabdodon* ou crocodiliens).
- La « **Collection Lavigne** » (don versé à la collection institutionnelle du CD13), constituée de gastéropodes et d'une fibula fragmentaire de titanosaurien (CD13-Pal.2017.3.1, figure 1A). Cette dernière a été généreusement donnée au Département des Bouches-du-Rhône, marquant ainsi le premier retour d'un fossile découvert sur Roques-Hautes, avant la création de la réserve naturelle, dans les collections paléontologiques départementales.
- La « **Collection Méchin** » (collection privée, Vitrolles ; figures 2 et 4), est constituée de nombreux restes fragmentaires de vertébrés collectés entre 1983 et 1985 (ossements de **droméosauridés\***, de **rhabdodontidés\*** et de crocodiliens), puis en octobre 1989 lors d'une fouille organisée par le CNRS (ossements de droméosauridés, de rhabdodontidés et de crocodiliens), et enfin lors d'une collecte de surface en septembre 1993 (ossements de crocodiliens) (voir encart 3 dans le chapitre 1). La Collection Méchin est la seule, à ce jour, à avoir fait partiellement l'objet d'une publication scientifique sur la base de restes osseux de dinosauriens provenant de Roques-Hautes (Le Loeuff *et al.*, 1992 ; Le Loeuff et Buffetaut, 1998).
- La « **Collection Musée des Dinosauriens d'Espéraza** » (collection institutionnelle associative), regroupe une partie du matériel de *Variraptor* publié (Le Loeuff *et al.* 1992 ; Le Loeuff et Buffetaut, 1998). Il s'agit de moulages de la vertèbre cervico-dorsale (MDE-D.01) et de la **vertèbre sacro-caudale\*** (MDE-D.02) conservées dans la Collection Méchin.
- La « **Collection RNSV** » (collection institutionnelle du CD13), regroupe l'ensemble des découvertes effectuées sur le territoire de la réserve naturelle depuis sa création en 1994. Cet article ne traite que des fossiles de cette collection ayant été récoltés dans le secteur des Grands-Creux en 2010 et 2011 (figures 6, 7A, 8A-B, 9A-D, 10A, 11A, 12B-C). Le résultat des fouilles menées depuis 2015, par le Département des Bouches-du-Rhône en collaboration avec le MHNA, sera traité dans un prochain volume.

Figure 1 : Spécimens constituant les premières découvertes d'ossements effectuées sur la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire avec : la « Collection Dughi-Sirugue » (A-B et D-E) contenant un cartel indiquant « Roques-Hautes, [site] n°2, mai 1957, Dughi-Galito-Laurent-Sirugue » (A), une possible côte de *Rhabdodon* (MHNAix-PV.1978.2) découverte à Roques-Hautes (B), un fragment de dent de *Rhabdodon* (MHNAix-PV.2005.128b) et son cartel mentionnant « lavage, [site] point 4, dent, Roques-Hautes Les Grands-Creux » (D) et une dent de *Rhabdodon* (MHNAix-PV.1978.1) découverte à « Beaurecueil Roques-Hautes » (E) ; la « Collection Kérourio » avec un possible tibia de *Rhabdodon* (MHNAix-PV. sans numéro) découvert dans les Grands-Creux (C) ; et la « Collection Martin » avec une dent dentaire de *Rhabdodon* (F).



**Encart 1 : Le mystère d'une découverte ancienne !**

Dans sa *Statistique du département des Bouches-du-Rhône*, le géologue Hippolyte de Villeneuve-Flayosc (1821) signale une étonnante découverte. Il s'agit d'un ossement d'aurochs contenu dans un gros bloc de « Brèche du Tholonet », conservé par le diplomate Felix Lajard. L'âge de ces brèches étant dano-montien, il est peu probable qu'un mammifère (aurochs ou autre) de cette taille ait pu être découvert dans cette formation géologique. En revanche, la distinction précise de ces brèches dans le secteur de la réserve naturelle ayant été très récente (Leleu, 2005), il se pourrait que le bloc provienne d'autres brèches, comme celles datant du Campanien supérieur, à proximité (chapitre 2). Les dimensions d'un os d'« aurochs » pourraient très bien coïncider avec celles d'un os de dinosaurien de taille moyenne (*Rhabdodon*, titanosaurien). Ce signalement de « premier dinosaurien provençal » ne pourrait être confirmé qu'avec l'étude de l'os en question. Malheureusement, si nous savons que la Collection Lajard fut achetée par le Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille (Fabre, 1869), aucune mention de ce fossile n'est faite dans le catalogue des collections du muséum par Répélin (1900). Le mystère reste donc entier.

Les premières découvertes d'ossements de dinosauriens sur la réserve naturelle, d'importance scientifique, remontent donc à mars et avril 1983, puis furent complétées en janvier et octobre 1985. Il s'agissait de différentes vertèbres [**dorsale\*** (CM.167), sacro-caudale (CM.223) et **caudale\*** (CM.238)], de fragments de côtes (dont le spécimen CM.284) et d'un fragment de griffe (CM.249) attribués en très grande majorité à un petit dinosaurien carnivore **théropode\*** (figure 2). Certains de ces éléments furent par la suite étudiés par J. Le Loeuff et l'un de nous (E. B. dans Le Loeuff *et al.*, 1992). Des fouilles furent organisées en septembre 1989 (photos 1, 3 et 4), sous la direction de J. Le Loeuff et de l'un de nous (E. B.) et la supervision de N. Gomez (représentant la Réserve Naturelle Géologique de Haute-Provence). Malheureusement, les découvertes furent quelque peu décevantes. C'est ainsi que dans une publication de 1992, Le Loeuff et l'un de nous (E. B.) indiquèrent la mise au jour de quelques restes de vertébrés : crocodyliens indéterminés, une dent de théropode indéterminé, et un fémur d'« **hypsilophodontidé\*** » (actuellement interprété comme étant très vraisemblablement du *Rhabdodon*). Il n'existe pas plus d'informations à ce sujet et la localisation du lieu de stockage de ces fossiles est toujours en cours.

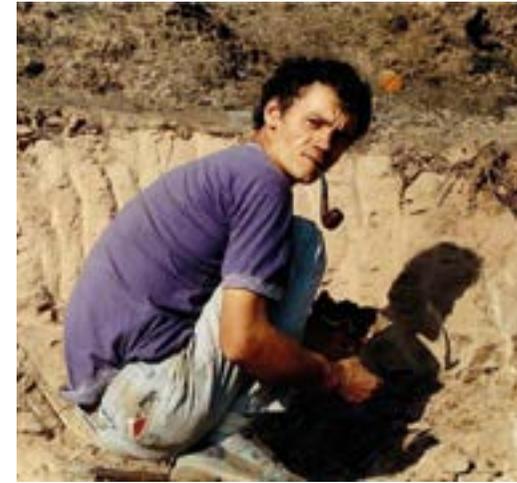


Photo 1 : Patrick Méchin, co-découvreur du Variraptor, lors des travaux de dégagement de la barre sableuse recouvrant le niveau fossilifère (photo A. Méchin-Salessy, 1989).



Photo 2 : Annie Méchin-Salessy, co-découvreuse de Variraptor, en cours de dégagement d'un fémur de titanosaurien sur le site de Fox-Amphoux - Métisson dans le Var (photo P. Méchin, 1998).

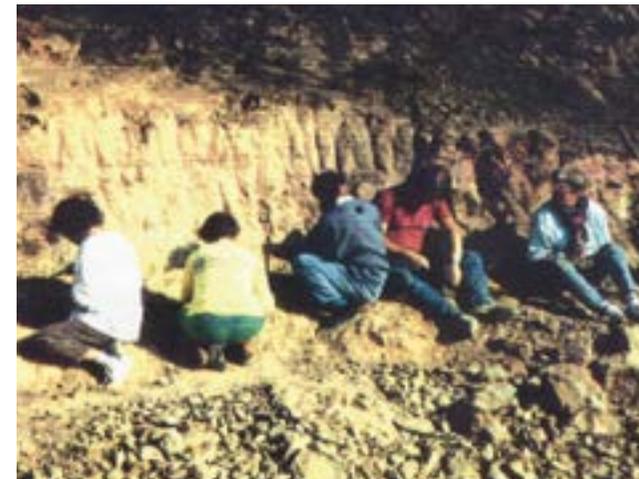


Photo 3 : Travaux de dégagement de la barre sableuse recouvrant le niveau fossilifère de Roques-Hautes, avec J. Le Loeuff, A. Méchin-Salessy, pers. indet., D. Vasse et G. Martini (photo N. Gomez, 1989).

Photo 4. Travaux de dégagement de la barre sableuse recouvrant le niveau fossilifère de Roques-Hautes, avec D. Vasse, J. Le Loeuff, P. Méchin et E. Buffetaut (photo N. Gomez, 1989).



## 1. VARIRAPTOR : LE « RAPTOR » PROVENÇAL

### 2.1. LES PREMIERS OSSEMENTS DE LA RÉSERVE NATURELLE

La découverte de *Variraptor* s'est effectuée en deux temps. Parmi les premiers éléments mis au jour sur Roques-Hautes par A. et P. Méchin (photos 1 et 2), seules une vertèbre cervico-dorsale (CM.167/MDE-D.01) et une vertèbre sacro-caudale (CM.223) retinrent l'attention de Le Loeuff et de l'un de nous (E. B.) (Le Loeuff *et al.*, 1992). Les caractéristiques anatomiques telles que des épiphyses proéminentes (deux éminences osseuses dorsales ; figure 2B et C) et une hypapophyse bien développée sur la vertèbre cervico-dorsale (une éminence osseuse ventrale ; figure 2A et E) évoquèrent une forte affinité avec le droméosauridé américain *Deinonychus antirrhopus*. Ces deux restes provenant de Roques-Hautes et un fémur (CM.203/MDE-D.49) provenant de Fox-Amphoux – Métisson, dans le Var, confirmaient donc la présence de cette famille de dinosauriens carnivores en Provence. La présence de droméosauridés n'était pourtant pas une surprise puisque des dents isolées avaient déjà été signalées dans différents gisements du Sud de la France quelques années auparavant, notamment sur la commune de Pourrières, dans le Var (Buffetaut *et al.*, 1986). Ces nouvelles découvertes permirent, en revanche, d'en savoir davantage sur la taille et l'identité de ce « raptor » provençal.

### 2.2. QU'EST CE QUE VARIRAPTOR ?

La première étude du petit dinosaure carnivore de Le Loeuff *et al.* (1992) fut suivie, six ans plus tard, d'un nouvel article présentant de nouveaux ossements provenant de Fox-Amphoux (site de La Bastide Neuve cette fois) dans le Var. Le Loeuff et Buffetaut (1998), présentaient ainsi un sacrum (MDE-D169) et un humérus droit (MDE-D158). Le sacrum est l'élément le plus important car la dernière vertèbre le constituant permet une comparaison avec la vertèbre sacro-caudale de Roques-Hautes. Leur morphologie très similaire incita à considérer ces éléments comme appartenant à une même espèce de droméosauridé. Ainsi, une seule et même espèce aurait parcouru les secteurs de Roques-Hautes et de Fox-Amphoux à la fin du Campanien. La comparaison de ces ossements avec ceux d'autres droméosauridés connus à l'époque (*Deinonychus*, *Saurornitholestes*, *Velociraptor*, *Dromaeosaurus* et *Elopteryx*) conduisit à ériger un nouveau taxon. Bien que la découverte des ossements de Roques-Hautes soit antérieure à celle du site varois, Le Loeuff et l'un de nous (E. B.) choisirent la simplicité du nom du département varois et nommèrent ainsi *Variraptor* ou le « Voleur du Var ». Ce choix était également esthétique car « Voleur des Bouches-du-Rhône » aurait été traduit en « Buccorhodaniraptor ». La description de ce nouveau genre étant consécutive au travail de prospection d'A. et P. Méchin, Le Loeuff et l'un de nous (E. B.) donnèrent le nom d'espèce en leur hommage : *Variraptor mechinorum*. C'est ainsi que *Variraptor* devint le premier dinosaure décrit sur le territoire de l'actuelle Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, ainsi que le premier droméosauridé français. *Variraptor* était un petit prédateur de moins de 2,5 m, carnivore, agile et vélocé. Comme les autres membres de sa famille, il devait être muni d'une importante griffe courbée en forme de faucille sur le second orteil (*Deinonychus* et *Velociraptor* ont livré les plus célèbres exemplaires). Les « raptors » sont les plus proches parents des oiseaux et certains sont informellement surnommés « dinoiseaux » depuis la découverte de plusieurs dizaines de spécimens portant des traces de plumes fossilisées. Cependant, les ossements attribués à *Variraptor* ne permettent pas de confirmer la présence de plumage. Ses restes, découverts dans les siltites du **faciès\*** Rognacien inférieur, furent tout d'abord datés du Campanien supérieur au Maastrichtien inférieur (Le Loeuff et Buffetaut, 1998). Mais des études plus récentes ont revu cette datation au seul Campanien supérieur (Tortosa, 2014). Comme toute espèce nouvellement créée, *Variraptor* est défini par une diagnose (encart 2 et figure 2), véritable carte d'identité anatomique d'un taxon. Une diagnose peut être amendée avec de nouvelles caractéristiques anatomiques. Et celle de ce dinosaure, basée sur deux gisements différents, fut à l'origine d'une controverse entre scientifiques (Le Loeuff et Buffetaut, 1998).

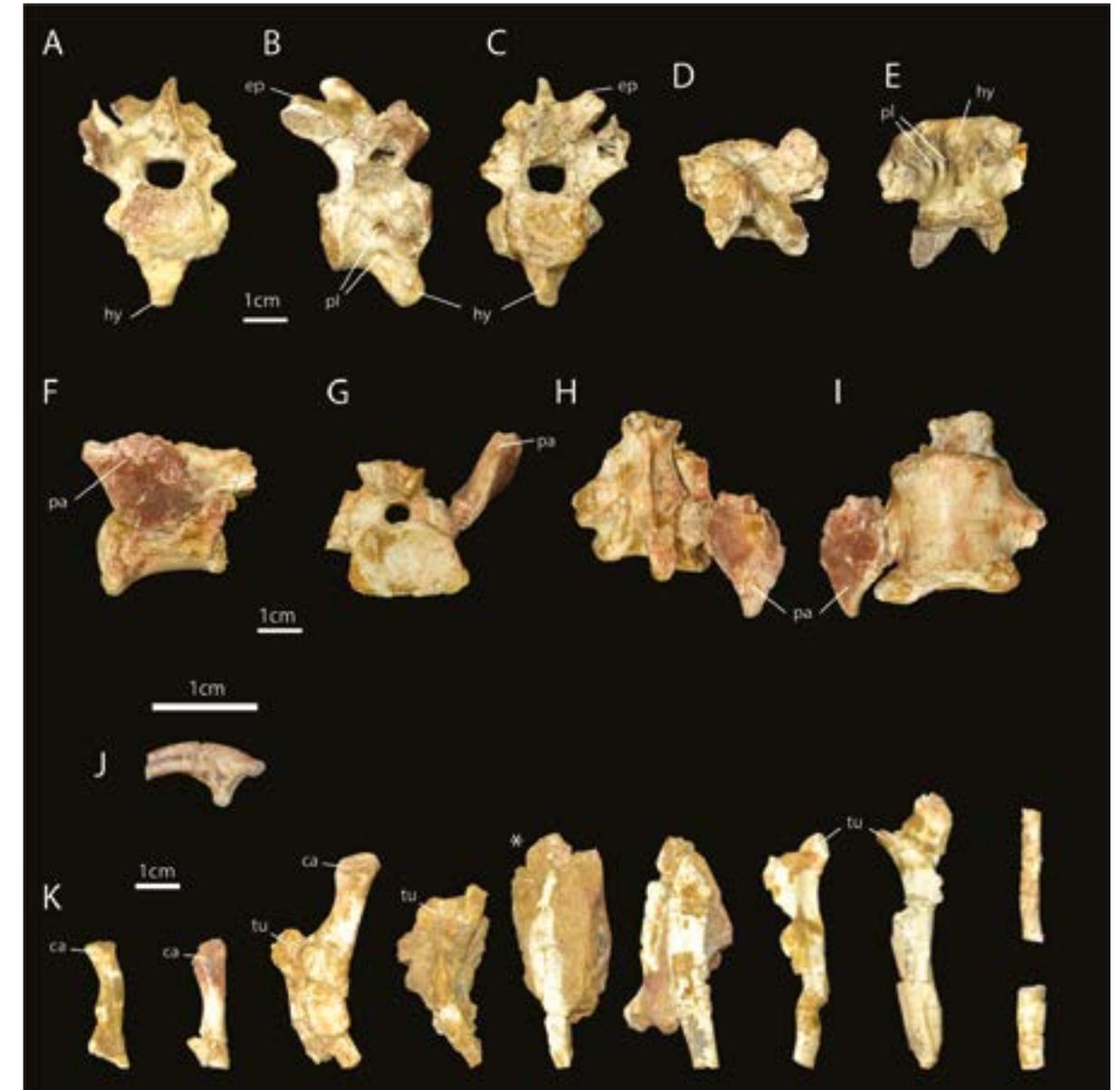


Figure 2 : Matériel rapporté à *Variraptor mechinorum* (A-I) et restes non publiés de Droméosauridés (J, K) provenant de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire : vertèbre cervico-dorsale (A-E : CM.167/MDE-D.01) ; vertèbre sacro-caudale (G-I : CM.223) ; griffe d'orteil (J : CM.249) et fragments de côtes (K, \* : CM.284), en vues antérieures (A, K), latérales (B, F, J), postérieures (D, G), dorsales (D, H) et ventrales (E, I). Abréviations : ca = capitulum, ep = épiphysse, hy = hypapophyse, pa = processus aliforme, pl = pleurocèle, tu = tuberculum.

**Encart 2 : Diagnose de *Variraptor mechinorum* :**

La diagnose émendée de *Variraptor mechinorum* (par Chanthasit et Buffetaut, 2009 *contra* Turner *et al.*, 2012) en fait un Dromaeosauridae caractérisé par :

- des vertèbres cervico-dorsales :
  1. portant des épiphyses proéminentes (figure 2B et C),
  2. possédant des hypapophyses très développées (figure 2A-C et E),
  3. pourvues de deux pleurocèles (figure 2B et E),
- des vertèbres dorsales :
  4. possédant un **centrum\*** antéropostérieurement court,
- d'un sacrum :
  5. constitué de cinq vertèbres sacrées coossifiées,
- une vertèbre sacro-caudale :
  6. pourvue d'un centrum de forme trapézoïdale (figure 2G),
  7. possédant des processus transverses « aliformes » (formant de petites ailettes) (figure 2F-I),
- des humérus :
  8. possédant une crête deltopectorale bien développée,
  9. munis d'un tubercule interne bien développé,
  10. portant un tubercule médial fortement développé.

## 2.3. VARIRAPTOR VERSUS PYRORAPTOR : QUEL EST LE « RAPTOR » DE TROP ?

*Variraptor* ne sera pas resté longtemps le seul petit carnivore de Provence. Deux ans après la description du « voleur du Var », Allain et Taquet (2000) publient les restes d'un droméosauridé provenant de Trets, commune située dans le bassin d'Aix-en-Provence. La découverte se compose d'éléments interprétés comme appartenant à un seul et même individu. Cette annonce soulève une polémique sur la présence de ces deux petits théropodes dans la même région et dans le même intervalle de temps (Campanien supérieur). L'annonce de ce nouveau droméosauridé eut une répercussion négative sur *Variraptor*. En effet, Allain et Taquet (2000) affirmaient dès l'introduction de leur article leurs doutes sur la validité de *Variraptor* (considéré comme un **nom douteux\***) et ce, pour deux raisons. La première était l'absence de caractères distinctifs sur le matériel holotypique (par rapport à d'autres droméosauridés). Autrement dit, ces ossements n'étaient pas distinguables de tout autre dinosaurien carnivore. La seconde raison avançait que la partie de la diagnose valable ne reposait en fait que sur la vertèbre cervico-dorsale découverte à Roques-Hautes. Le déclassement du matériel holotypique découvert dans le Var entraînait *de facto* celui du matériel associé. *Pyroraptor* devenait pour ses auteurs le seul droméosauridé valide pour le Crétacé supérieur de Provence.

Il fallut attendre une dizaine d'années pour voir une réponse officielle de l'un de nous (E. B.) avec la publication de nouveaux restes de droméosauridés provenant de l'Hérault et du Var (Chanthasit et Buffetaut, 2009). Cette nouvelle étude fit un point sur la validité du matériel holotypique de *Pyroraptor* et contesta le rejet de *Variraptor* (une réflexion partagée par J. Le Loeuff, cité en commentaire).

Concernant la nature de *Variraptor*, d'un point de vue systématique, cette dernière étude rappela que l'**holotype\*** (une vertèbre dorsale postérieure et un sacrum) était clairement distingué des éléments rapportés. Les autres ossements : un humérus et un **ilion\*** de Fox-Amphoux - Bastide Neuve, un fémur de Fox-Amphoux - Métiesson et les vertèbres (**cervico-dorsale\*** et sacro-caudale) de Roques-Hautes ne constituaient donc que des apports complémentaires. Cette clarification permet d'écarter le doute émis, à tort, sur la nature « chimérique » de *Variraptor*. Comme le rappelèrent les auteurs de cette étude, l'humérus et l'ilion de Fox-Amphoux - Bastide Neuve étaient rapportés à *Variraptor mechinorum* car ils provenaient du même gisement que l'holotype, et peut être du même individu. C'est d'ailleurs le même raisonnement qui fut appliqué au matériel de *Pyroraptor olympius* d'après Allain et Taquet (2000). Si ces derniers remettaient en cause cette association, la plus parcimonieuse, il en aurait dû être de même pour les restes de *Pyroraptor* qui furent également découverts désarticulés. Il n'était donc pas totalement certain qu'ils puissent appartenir à un même individu. Sur ce point, nous préférons actuellement retenir le minimum d'individus possibles par gisement et donc considérer les holotypes de *Variraptor* et *Pyroraptor* comme étant constitués, chacun d'eux, par l'ensemble du matériel provenant de leur gisement respectif (Fox-Amphoux - Bastide Neuve pour le premier et Trets - La Boucharde pour le second) à condition qu'il n'y ait pas de problème d'os en doublons ou de variations de proportions parmi ceux-ci. Le matériel complémentaire dernièrement décrit (Chanthasit et Buffetaut, 2009), provenant de la localité-type (un gisement de quelques mètres carrés), bénéficie donc du même traitement. La vertèbre dorsale postérieure constituant l'holotype s'articulait très bien avec le sacrum, il s'agissait donc indéniablement du même individu. De plus, l'ilion rapporté s'articulait également bien au sacrum (holotype), ce qui confirme son appartenance à ce même individu. Quant au matériel de Roques-Hautes, il fut rapporté à celui de *Variraptor mechinorum* sur la base de la forte ressemblance de forme entre la vertèbre sacro-caudale et les vertèbres formant le sacrum provenant de Fox-Amphoux - Bastide Neuve. Sur ce point ci, en revanche, une réserve pourrait être émise. Seule la découverte de matériel commun aux deux gisements permettra de réunir l'ensemble des découvertes à *Variraptor mechinorum*, sans aucun doute possible.

Concernant la validité de la diagnose de *Variraptor mechinorum*, Chanthasit et Buffetaut (2009) détaillèrent la comparaison de la vertèbre dorsale holotypique et du sacrum avec celles d'autres droméosauridés, afin d'en montrer la claire distinction. Ainsi, *Deinonychus* possède un centrum plus long et des pleurocèles plus larges. *Velociraptor* ne possède pas de pleurocèle sur ses vertèbres dorsales postérieures. *Microraptor* n'a pas de pleurocèles sur les dorsales et sa dernière vertèbre dorsale est plus allongée. Enfin, *Sinornithosaurus* présente une dernière vertèbre dorsale moins comprimée antéropostérieurement. Et ce fut au tour des pro-*Variraptor* de rétorquer que la diagnose de *Pyroraptor* n'était pas non plus correctement définie (voir Chanthasit et Buffetaut, 2009, pour plus de détails). La correction de diagnose fut en partie reprise et affinée par la révision des droméosauridés entreprise par Turner *et al.* en 2012 (encart 3).

Encart 3 : La diagnose révisée de *Pyroraptor olympius* (par Turner *et al.* (2012), en fait un Dromaeosauridae caractérisé par :

- Des dents :
  1. portant des denticules sur leur carène distale mais très peu sur leur carène mésiale (antérieure).
- des métatarses II :
  2. ventralement concaves,
  3. de longueur quasiment égale à celle de l'ulna.

L'issue de cette discussion sur la validité des deux taxons est donc liée à la découverte d'ossements communs. Malheureusement, l'ulna rapporté à *Variraptor mechinorum* par Chanthasit et Buffetaut (2009) ne présentait pas de caractère remarquable et le seul caractère diagnostique chez *Pyroraptor* fut invalidé par Turner *et al.* (2012) en faveur d'une déformation taphonomique. En dépit de leur légère différence morphologique, il ne peut pas être exclu que ces ossements appartiennent à une seule et même espèce. Si de futures découvertes confirmaient cela, *Pyroraptor* serait alors considéré comme synonyme junior de *Variraptor*. En attendant, les ossements de *Variraptor* et *Pyroraptor* montrent des caractères diagnostiques, rendant donc les deux taxons valides pour les auteurs de l'étude de 2009 (Chanthasit et Buffetaut, 2009). Nous maintenons ce point de vue dans le présent article.

## 2.4. LES RESTES DE DROMÉOSAURIDÉS NON PUBLIÉS PROVENANT DE LA RÉSERVE NATURELLE

La Collection Méchin comprend un certain nombre d'éléments squelettiques de petits théropodes. Un ilion décrit par Chanthasit et Buffetaut (2009) appartiendrait vraisemblablement au même individu (une vertèbre dorsale et un sacrum) décrit par Le Loeuff et Buffetaut en 1998. Les autres ossements ne sont, en revanche, pas rapportés formellement à *Variraptor* faute d'éléments comparables. Néanmoins, leurs affinités avec les caractéristiques anatomiques, leur taille et leurs proportions, n'excluent pas cette éventualité. Seules de nouvelles découvertes pourront confirmer ce point. Ces éléments comprennent une griffe (figure 2J) et onze fragments de côtes (figure 2K). Les côtes sont similaires entre elles, en forme et taille, ce qui laisse penser qu'elles auraient toutes pu appartenir à un même individu. La forme générale et la position du capitulum et du tuberculum (les deux extrémités articulaires d'une côte) sont très proches de celles du droméosauridé *Deinonychus* (Ostrom, 1969). Tout comme chez ce taxon, à la base du capitulum, proximement, le corps osseux s'élargit légèrement et donne un léger « T » en coupe transversale. La surface capitulaire est convexe, ovale, lisse et légèrement plus large que la surface tuberculaire qui est concave et ovale. La griffe CM.249 est également caractéristique d'un petit théropode. Elle possède une allure et des proportions proches de celles d'une griffe de main ou d'orteil I, III ou IV d'un droméosauridé (contrairement à la griffe II qui est l'énorme « griffe tueuse » caractéristique de cette famille). Elle est très proche de ce que l'on observe chez *Deinonychus* ou *Velociraptor* (Ostrom, 1969 ; Norell et Makovicky, 1999). Cette griffe est recourbée, avec une courbure plus prononcée que des griffes podales. Sa forte compression latérale oriente également vers une position manuelle car une griffe podale aurait été subtriangulaire en coupe. Chaque côté est marqué par un profond sillon s'étendant depuis la base de la facette articulaire jusqu'à l'extrémité préservée (et devait sûrement continuer jusqu'à la pointe). La bordure ventrale de l'articulation porte le tubercule du fléchisseur, très développé ventralement, montrant une bonne flexibilité du doigt.

## 2.5. QU'APPORTE LA DÉCOUVERTE DE VARIRAPTOR FAITE SUR LA RÉSERVE NATURELLE ?

Malgré la nature très fragmentaire de ces découvertes provençales, Le Loeuff et l'un de nous (E. B.) supposèrent que les droméosauridés européens auraient pu appartenir à une lignée propre à cet archipel d'îles. Ils proposèrent initialement un classement des spécimens provenant de Roques-Hautes, Fox-Amphoux et de Roumanie (*Elopteryx*) au sein des éloptérygidés (un clade de **maniraptorien**s\*, maintenant abandonné).

Ce groupe de petits théropodes européens aurait suivi le même processus de dispersion et d'isolement insulaire que d'autres familles de dinosauriens (rhabdodontidés, nodosauridés) en devenant des « survivants » d'une faune uniforme occupant l'Europe et l'Amérique du Nord au Crétacé inférieur, voire au Jurassique supérieur. En 2012, Turner *et al.* entreprenaient une révision complète des droméosauridés. *Pyroraptor* fut confirmé comme étant un droméosauridé, bien que les auteurs reconnussent qu'il était difficile d'établir une diagnose précise. Les caractéristiques proposées par Allain et Taquet (2000) étaient en effet largement répandues chez les droméosauridés. Les auteurs de la révision n'en retiennent que deux (encart 2).

En revanche, *Variraptor* reçut la mention « *révision de la diagnose non applicable* », sans aucune justification particulière. Turner *et al.* le considéraient donc également comme un nom douteux. Cependant, en tenant compte des résultats d'analyses phylogénétiques récentes, *Variraptor* posséderait bien des caractéristiques anatomiques uniquement partagées par des **deinonychosauriens**\* (lame **préacétabulaire**\* de l'ilion en forme crochue ; Agnolin et Novas 2011) et des droméosauridés (**pleurocèles**\* uniquement présents sur les vertèbres sacrées antérieures ; Turner *et al.*, 2012). Le déclassement de *Variraptor mechinorum* en nom douteux n'est donc pas si évident que cela, d'autant plus que l'un des caractères diagnostiques de *Variraptor mechinorum* proposé par l'un de nous (E. B. dans Le Loeuff et Buffetaut, 1998) - une vertèbre dorsale courte antéropostérieurement - pourrait finalement être une autapomorphie au sein des droméosauridés de grande taille. Il est difficile de savoir si la révision de Turner *et al.* (2012) a pu avoir un effet négatif sur le traitement des découvertes provençales (ou européennes) ultérieures. Nous pouvons cependant constater que ce taxon n'est plus utilisé dans les analyses et discussions scientifiques sur les droméosauridés. Récemment, une étude portant sur des dents de droméosauridés espagnols (Torices *et al.*, 2015) indiqueraient la présence de *Pyroraptor* dans leurs gisements. Si les dents furent effectivement comparées à celles de *Pyroraptor* à cette occasion, ce ne fut pas le cas avec celles décrites en 2009 (Chanthasit et Buffetaut, 2009).

La question de la validité de *Variraptor* et *Pyroraptor* reste donc ouverte, et ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique. Les nombreuses découvertes effectuées depuis dix ans dans le Bassin d'Aix-en-Provence permettront très certainement d'affiner ces comparaisons et de statuer sur le nombre de droméosauridés dans le Crétacé supérieur de Provence.

## 3. DES RACINES, DES AILES ET DES DINOSAURIENS

### 3.1. 20 ANS PLUS TARD : DE NOUVELLES FOUILLES PALÉONTOLOGIQUES

Presque vingt ans se seront écoulés avant la mise au jour de nouveaux restes de dinosauriens sur la réserve naturelle, en dépit de recherches menées régulièrement sur les œufs des Grands-Creux (chapitres 4 et 5). Paradoxalement, les découvertes suivantes ne furent pas le fruit d'un projet scientifique planifié. En 2010, le Muséum d'Histoire Naturelle fut contacté par une équipe télévisée de France 2 afin d'effectuer un reportage sur les découvertes de dinosauriens de Provence. Les opérations conduites par le muséum aixois le long de l'A8 avaient en effet remis au goût du jour l'effervescence médiatique sur les dinosauriens de Provence. Le cadre visuel et sonore des abords d'une autoroute ne se prêtant pas à l'esthétique de l'émission *Des Racines et des Ailes*, c'est vers la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire que se porta l'attention des paléontologues aixois et des médias. Ainsi, avec l'accord du Département des Bouches-du-Rhône et en compagnie du Directeur-Adjoint de l'Environnement, Michel Bourrelly, et de l'un de nous (T. T.), une visite de repérage eut lieu dans les Grands-Creux le 25 août de cette même année. Cette prospection mit en évidence une vaste zone fossilifère (nommée BGC2) où plusieurs dizaines d'œufs apparaissaient du fait de l'érosion naturelle. À une cinquantaine de mètres, une autre zone (nommée BGC3) faisait apparaître de nombreux fragments osseux sur six secteurs proches entre eux.

Une fouille fut organisée par le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, en collaboration avec le Conseil Départemental des Bouches-du-Rhône, sur les deux zones, du 20 au 24 septembre 2010, afin de fournir un cadre adapté au tournage de l'émission (photo 5). Les découvertes dépassant les espérances, une seconde campagne de fouilles fut organisée sur les mêmes zones du 11 au 15 avril 2011 (photos 6 et 7). Lors de cette seconde campagne, les œufs fossiles découverts firent l'objet d'une étude portant sur la *Biologie de la ponte de deux espèces de dinosauriens du Campanien de Roques-Hautes* (Louppe, 2011). Les ossements furent étudiés par l'un de nous (T. T.) au Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (Tortosa, 2014).



Photo 5 : Tournage de l'émission Des Racines et des Ailes sur le secteur BGC2.3 en 2010 avec de gauche à droite : T. Tortosa, E. Turini, pers. Indet. 1, pers. Indet. 2, M. Bourrelly, P. Susini, B. Bailly, Pers. Indet. 3 (Photo : S. Ecochard).



Photo 6 : Fouilles de dégagements d'œufs sur la zone BGC2.2 avec de gauche à droite : E. Turini, G. Cheylan, F. Cauvet, pers. Indet., N. Bertucceli, A. Sampieri, T. Biggi, A. Viti (Photo : S. Ecochard).



Photo 7 : Fouilles de dégagements sur la zone à d'ossements BGC3.1 avec T. Tortosa (Photo : G. Cheylan).

### 3.2. DES DÉCOUVERTES ABONDANTES ET SURPRENANTES

#### 3.2.1. La zone BGC2 : Site à œufs de dinosauriens

À l'issue de la campagne de fouille de 2011, la zone fouillée couvrait une superficie inférieure à 30 m<sup>2</sup> mais plus d'une centaine d'œufs fossiles (complets ou fragmentaires) furent répertoriés, dont 92 furent prélevés. Ces œufs étaient répartis sur trois niveaux stratigraphiques distincts (correspondant aux niveaux BGC2.1a et .1b ; BGC2.2 et BGC2.3) sur environ 40 mètres d'épaisseur. Les résultats de ces recherches et des détails sur les découvertes effectuées sur cette zone seront présentés dans un prochain numéro des Cahiers de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

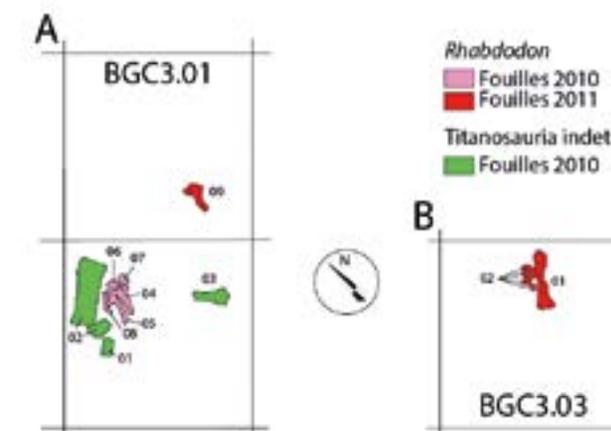
#### 3.2.2. La zone BGC3 : Site à ossements de dinosauriens

La zone **BGC3** fut donc la nouvelle aire de recherches de restes osseux de vertébrés du secteur des Grands-Creux. Très éloignée de celle ayant livré les restes de *Variraptor* (zone renommée depuis BRH1), cette zone a livré, sur 600 m<sup>2</sup>, six secteurs où affleuraient des os dispersés et fragmentaires. Ces zones sont localisées dans la formation silteuse rouge typique du faciès 'Rognacien inférieur' (chapitre 2) et proviennent de différents horizons fossilifères. La fouille fut rendue difficile par la topographie des lieux, ne permettant que des recherches superficielles très limitées.

Le secteur BGC3.1 fut le plus riche avec la découverte d'une dizaine d'ossements fragmentaires sur une zone inférieure à un mètre carré. Au moins trois individus sont recensés (voir figure 3A) :

- Titanosaurien indéterminé (individu 1) : un individu d'une dizaine de mètres de longueur comprenant une **scapula\*** fragmentaire (CD13-Pal.2019.2.2a-b ; figure 8A) et une possible **ulna\*** incomplète (CD13-Pal.2019.2.1 ; figure 9A-C) ;
- Titanosaurien indéterminé (individu 2) : un individu de taille inférieure à huit mètres de longueur, connu d'après une ulna presque complète (CD13-Pal.2019.2.3.1) ;
- *Rhabdodon* (individu 1) : un individu d'environ quatre mètres de long, constitué de deux vertèbres incomplètes (CD13-Pal.2019.2.4.3 et CD13-Pal.2019.2.4.4), d'une côte incomplète (CD13-Pal.2019.2.4.5), d'un ilion fragmentaire (CD13-Pal.2019.2.4.2 ; figure 6A) et d'une paire de **pré-pubis\*** incomplets (CD13-Pal.2019.2.4.1 et CD13-Pal.2019.2.4.6 ; figure 7A-B).

Figure 3 : Plans des secteurs **BGC3.01** (A) et **BGC3.03** (B) illustrant les découvertes d'ossements de titanosauriens indéterminés (A : 01-03) et de *Rhabdodon* (A : 04-09, B : 01-02). Pour BGC3.01 : 01 = CD13-Pal.2019.2.1 ; 02 = CD13-Pal.2019.2.2 ; 03 = CD13-Pal.2019.2.3.1 ; 04 = CD13-Pal.2019.2.4.1 ; 05 = CD13-Pal.2019.2.4.2 ; 06 = CD13-Pal.2019.2.4.3 ; 07 = CD13-Pal.2019.2.4.4 ; 08 = CD13-Pal.2019.2.4.5 ; 09 = CD13-Pal.2019.2.4.6. Pour BGC3.03 : 01 = CD13-Pal.2019.4.1.1 ; 02 = CD13-Pal.2019.4.1.2-.3. Echelle en mètres.



Le secteur **BGC3.2** est localisé dans une zone beaucoup plus détritique, dans un niveau microconglomératique. Un seul fragment d'os est connu et pourrait correspondre à un fragment de fémur de *Rhabdodon* (CD13-Pal.2019.3.1).

Le secteur **BGC3.3** (figure 3B) est le plus intéressant car il livra un tibia (CD13-Pal.2019.4.1.1) et un arrière crâne de *Rhabdodon* (CD13-Pal.2019.4.1.2-.3). Cet arrière-crâne est le premier découvert dans le bassin d'Aix-en-Provence et, plus largement, du département. Cet os présente une mauvaise préservation avec une dislocation en plusieurs éléments. Ces éléments étaient plaqués contre la **diaphyse\*** du tibia. Celui-ci a donc fait barrage aux éléments plus petits lors de leur transport dans un écoulement d'eau (direction vers l'est). Cette configuration des ossements rend difficile leur attribution à un seul et même individu. Pour cette raison ces os sont attribués à l'individu désigné « 2/3 ».

Le secteur **BGC3.4** est un secteur très réduit situé dans une ravine, à l'accès difficile. Il a présenté une concentration élevée de petits fragments osseux associés à un élément de grande taille (30 cm). L'autre intérêt de ce secteur est l'association de ces ossements avec des coquilles isolées dans un même horizon fossilifère. Ce secteur ne put être fouillé entièrement lors de sa découverte et l'érosion naturelle semble avoir emporté les derniers ossements fossiles restant sur site.

Le secteur **BGC3.5** situé sur la pente abrupte d'un autre **talweg\*** ne livra qu'un seul os, il s'agit vraisemblablement d'une **fibula\*** de titanosaurien (CD13-Pal.2019.5.1.1). L'os est très abîmé du fait de l'activité d'organismes bioturbateurs. La taille de cet os laisse entrevoir un titanosaurien de taille moyenne (environ 10 mètres).

Les nombreux éléments collectés ont permis une description préliminaire et la reconnaissance d'au moins deux taxons sur la Réserve Naturelle, *Rhabdodon* et un titanosaurien indéterminé, qui sont décrits pour la première fois dans ce volume.

#### Encart 4 : Diagnose de *Rhabdodon priscus* :

La diagnose éméndée de *Rhabdodon priscus* (par Pincemaille-Quillevéré, 2002), le caractérise par :

- un os **surangulaire\*** :
  1. avec deux **foramina\*** sur la surface latérale,
- un os **dentaire\*** avec :
  2. un vaste plateau oblique entre la paroi latérale et la rangée alvéolaire,
  3. avec neuf alvéoles dentaires,
  4. avec des bords, dorsal et ventral, parallèles,
- des dents avec :
  5. des arêtes parallèles sans arête principale saillante et sans courbure (**dents maxillaires\*** uniquement),
  6. une arête primaire distale saillante légèrement décalée de leur l'axe (**dents dentaires\*** uniquement),
  7. un émail réparti de façon hétérogène, plus épais sur la surface labiale des dents maxillaires et linguale des dents dentaires,
- des vertèbres **cervicales\*** :
  8. munies d'épines neurales orientées antérieurement et de processus transverses larges et très développés,
  9. présentant des centrums **opisthocœles\***,

- des vertèbres dorsales :
  10. possédant des épines neurales très développées (environ 64% de la hauteur totale),
  11. présentant des centra **amphicœles\*** à **platycœles\***,
- un sacrum\* :
  12. composé de six **vertèbres sacrées\*** soudées et d'une **vertèbre dorso-sacrée\*** non soudée au sacrum,
- des **scapulas\*** :
  13. présentant une extrémité distale fortement élargie et des bords dorsal et ventral concaves,
  14. pourvues d'un **processus\*** dorsal beaucoup moins développé que le processus ventral,
  15. avec un **processus d'acromion\*** bien développé,
- des **coracoïdes\*** :
  16. présentant un **processus sternal\*** fort,
  17. avec un foramen coracoïde proche de la cavité glénoïde,
- des **pubis\*** :
  18. munis d'un processus pré-pubien long, aplati latéralement et droit,
  19. avec un **foramen obturé\*** fermé,
  20. avec un petit processus ventral,
- des **ischions\*** :
  21. avec **lame ischiatique\*** aplatie latéralement et droite, avec une extrémité distale élargie,
  22. avec un **processus obturé\*** se situant dans la moitié proximale de la lame,
- des fémurs :
  23. avec un **quatrième trochanter\*** proéminent mais non pendant,
  24. avec un bombement proximo-latéral sur la surface caudale,
  25. plus longs que le tibia,
- des pieds :
  26. munis de quatre doigts se terminant par des **phalanges unguéales\***.

## 4. RHABDODON, LE DINOSAURIEN VEDETTE PROVENÇAL

### 4.1. QU'EST CE QUE RHABDODON ?

*Rhabdodon* est un genre de dinosaurien **ornithischien\* ornithopode\* iguanodontien\*** (primitif) appartenant à la famille des rhabdodontidés (encart 4). Décrit par Matheron en 1869, il s'agit du premier dinosaurien identifié et nommé en Provence (Matheron, 1869a-b). Le matériel **type\*** (conservé au Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille) fut découvert dans les années 1840 lors du percement du tunnel de la Nerthe (reliant Gignac-la-Nerthe à Marseille). *Rhabdodon* était herbivore. En effet, il est muni de dents robustes aux couronnes cannelées, dont il tire son nom de genre, qui fonctionnaient comme des sécateurs (figure 1D). Cet animal pouvait être bipède ou quadrupède en fonction de l'âge et de sa vitesse de déplacement, comme la plupart des autres gros ornithopodes. La taille maximale du plus gros individu connu approche les 7 mètres bien que la majorité des découvertes correspondent à des individus plus modestes (3 à 4 mètres). Le crâne complet reste inconnu mais des récentes découvertes effectuées dans le Var et l'Hérault pourraient prochainement combler cette lacune. Les restes découverts dans le faciès Rognacien inférieur furent initialement datés du Maastrichtien (Buffetaut et Le Loeuff, 1991) mais des études plus récentes ont revu cette datation au Campanien supérieur (Tortosa, 2014).

*Rhabdodon* est un dinosaurien endémique de l'île Ibéro-armoricaine (incluant Espagne, Portugal, le Sud de la France en ajoutant possiblement le Massif Central et l'Armorique) durant le Crétacé supérieur. Deux espèces de *Rhabdodon* sont actuellement considérées comme valides, *Rhabdodon priscus* et *R. septimanicus* (Matheron, 1869a-b ; Buffetaut et Le Loeuff, 1991), se différenciant sur l'unique morphologie de leurs os dentaires (principal os constituant la mâchoire inférieure). Un second genre fut dernièrement décrit en Provence, *Matheronodon*, basé sur une mâchoire supérieure et des dents isolées (Godefroit *et al.*, 2017). Parmi les autres rhabdodontidés européens, *Mochlodon* (d'Autriche et de Hongrie) et *Zalmoxes* (de Roumanie, voir figures 9H et 9K) sont beaucoup plus petits. Il a été suggéré que *Rhabdodon* serait finalement un exemple de gigantisme insulaire (Ősi *et al.*, 2012).

### 4.2. LES DÉCOUVERTES DE RHABDODON EN PROVENCE

Les rhabdodontidés, représentés en France et en Espagne par les genres *Rhabdodon* et *Matheronodon*, sont les dinosauriens connus par les plus nombreux restes osseux (Allain et Pereda Suberbiola, 2003 ; Chanthasit, 2010 ; Godefroit *et al.*, 2017). Ces restes sont connus majoritairement par du matériel fragmentaire et isolé mais la description de squelettes partiellement conservés en articulation a permis une meilleure compréhension de l'anatomie générale de ce genre (Pincemaille-Quillevéré, 2002 ; Chanthasit, 2010 ; Tortosa, 2014). *Rhabdodon* est connu depuis le Campanien inférieur de Villeveyrac, dans l'Hérault, (Buffetaut *et al.*, 1996) jusque dans le Campanien terminal de Vitrolles – Couperigne 2 (Chanthasit, 2010 ; Tortosa, 2014), et sans doute dans le Maastrichtien supérieur de Vitrolles – La Plaine (Valentin *et al.*, 2012). Pour le moment la quasi-totalité des découvertes est attribuée à l'espèce *R. priscus* (Matheron, 1869b). Cependant, l'étonnamment longue distribution temporelle de ce genre (presque dix millions d'années !) et la grande variabilité morphologique des nombreux spécimens découverts indiqueraient la présence de plusieurs espèces comme Buffetaut et Le Loeuff (1991) l'ont suggéré avec l'érection de *R. septimanicus* (à Montouliers, Hérault) ou avec l'observation d'une potentielle nouvelle espèce naine (Ősi *et al.*, 2012). Malheureusement, le matériel type ne fut que rarement comparé directement aux découvertes récentes (Buffetaut et Le Loeuff, 1991 ; Pincemaille-Quillevéré, 2002). Les attributions de découvertes à l'espèce *R. priscus* ne se firent

le plus souvent que par défaut, en tenant compte des différences observées vis-à-vis des autres rhabdodontidés européens mieux connus (car plus complets) plutôt qu'avec le **lectotype\***, **paralectotype\*** et son matériel rapporté qui restaient très peu informatifs jusqu'à sa nouvelle révision (Tortosa, 2014 ; étude en cours). La récente description du nouveau rhabdodontidé *Matheronodon provencialis* ajoute un nouvel élément aux discussions sur la diversité générique et à la variabilité intragénérique ou ontogénétique (Godefroit *et al.*, 2017).

### 4.3. LES DÉCOUVERTES DE RHABDODON FAITES SUR LA RÉSERVE NATURELLE

La première découverte d'un ossement de *Rhabdodon* sur le territoire de la réserve naturelle fut faite sur le secteur de la ferme de Roques-Hautes (BRH1). Il s'agit d'un surangulaire provenant de la Collection Mechin (figure 5) qui est décrit pour la première fois dans cet article. Les découvertes suivantes, les plus importantes, furent effectuées lors des campagnes de fouilles 2010-2011 et concernaient des éléments fragmentaires, désarticulés, provenant de trois horizons fossilifères différents (appartenant donc à trois ou quatre individus différents). L'attribution de ces découvertes au genre *Rhabdodon* ne se base pas directement sur le matériel type décrit par Matheron (les spécimens du tunnel de la Nerthe), faute d'éléments en commun, mais plutôt sur la base des fortes similitudes anatomiques observées avec d'autres découvertes rapportées à ce genre en Provence (Lapparent, 1947 ; Pincemaille-Quillevéré, 2002). C'est notamment la découverte du spécimen de Vitrolles, attribués à *Rhabdodon priscus* (Pincemaille-Quillevéré, 2002), qui propose le plus de points de comparaisons possibles grâce à sa très bonne conservation. C'est en effet le spécimen offrant le plus haut niveau de complétude squelettique. *Matheronodon* est également présent en Provence, mais sa nature très fragmentaire et l'impossibilité de le comparer avec les autres restes de *Rhabdodon* (hormis les dents isolées) n'écartent pas la probabilité qu'il puisse s'agir d'un synonyme junior. En effet, la probabilité d'avoir plusieurs genres de même taille, occupant la même niche écologique, dans un milieu insulaire, étant faible, l'attribution à *Rhabdodon* serait une hypothèse plus **parcimonieuse\***.

L'arrière-crâne de *Rhabdodon* « individu 2/3 » provenant de la réserve naturelle (figure 4) est, malgré son état de conservation fragmentaire et incomplet, similaire aux autres découvertes attribuées à ce taxon, tandis qu'il se différencie nettement de ceux connus chez *Zalmoxes* (un autre rhabdodontidé) et plus généralement de ceux d'autres ornithopodes (Weishampel *et al.*, 2003). Cet arrière-crâne est constitué de deux ensembles d'os fusionnés correspondant aux parties droite et gauche de la boîte crânienne. La partie droite (CD13-Pal.2019.4.1.2) se compose de l'os **exoccipital\***, de l'os **pariétal\*** et de l'os **latérosphénoïde\*** (respectivement « EO », « P » et « L » sur la figure 4). La partie gauche (CD13-Pal.2019.4.1.3a) ne compte que l'os exoccipital et l'os pariétal. La forme gracile et l'orientation du processus paroccipital (« pp » sur la figure 4) conservé sont assez proches de celles attribuées à des individus juvéniles de *Rhabdodon*. Sur ce spécimen, ils sont longs, légèrement courbés ventralement et orientés postérolatéralement. Au contraire, ils sont courts et orientés médiodorsalement chez *Tenontosaurus* (un iguanodontien **basal\***) ou plus courbés et projetés plus dorsalement chez *Zalmoxes*. Les os formant le toit crânien étant manquants, les comparaisons demeurent limitées. L'absence de bordure dorsale du **foramen magnum\***, pourrait correspondre à l'os **supraoccipital\*** (ici manquant). L'implication de cet os dans la formation du foramen magnum rapproche le *Rhabdodon* de Roques-Hautes de *Camptosaurus*, *Dryosaurus*, *Hypsilophodon* et *Zalmoxes* et le différencie donc de genres plus dérivés tels qu'*Iguanodon*, *Ouranosaurus*, *Tenontosaurus* et les **hadrosauridés\***. Contrairement à *Zalmoxes* (Weishampel *et al.* 2003), la base des os exoccipitaux ne présente pas de condyloïdes réniformes (petites excroissances bulbeuses servant d'articulation et en forme de « haricot »). Latéralement, seule la sortie des **nerfs crâniens\*** V est bien visible. Sa position et celle de la **fenêtre ovale\*** sont homologues à celles observées chez *Zalmoxes* et *Tenontosaurus*. Trois fragments associés (CD13-Pal.2019.4.1.3b-d) sont très vraisemblablement d'autres os de la boîte crânienne, du toit ou du plancher de la cavité cérébrale. Il n'a pas encore été possible de les identifier correctement.

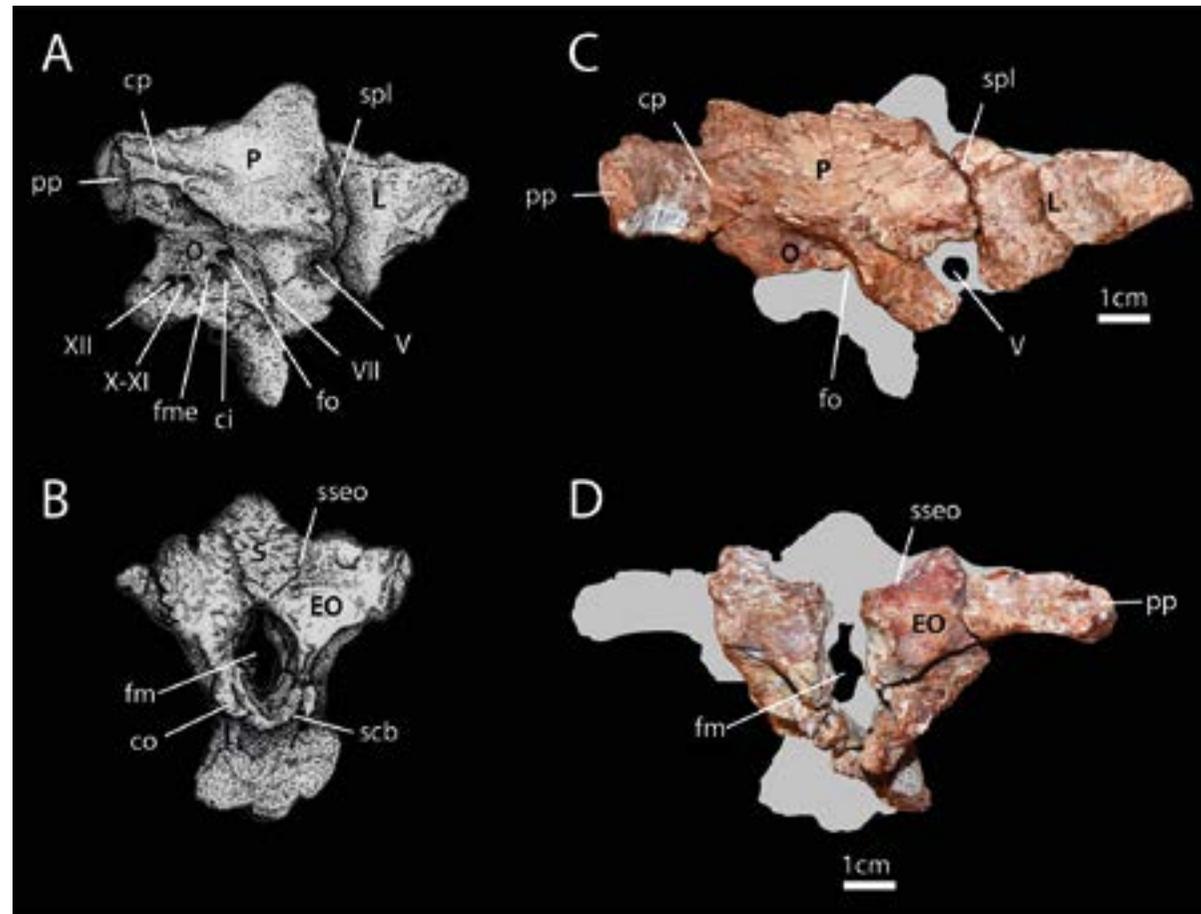


Figure 4 : Arrière-crâne de Rhabdodon découvert dans l'Hérault (A, B : MC-MN.25) et sur le secteur BGC3.03 (C : CD13-Pal.2019.4.1.2, D : CD13-Pal.2019.4.1.2-.3) en vue latérale droite (A, C) et postérieure (B, D), d'après Pincemaille et al., 2006. Abréviations : co = condyle occipital ; cp = crête prootique\* ; EO = os exoccipital ; fm = foramen magnum ; fme = foramen métotique\* ; fo = fenêtre ovale ; L = os latérosphénoïde ; scb = suture entre le condyle occipital et l'os basioccipital ; sseo = suture entre l'os supraoccipital et l'os exoccipital ; spl = suture entre l'os prootique\* et l'os latérosphénoïde ; O = os opisthotique ; P = os prootique ; pp = processus paroccipital ; S = os supraoccipital. Les chiffres romains indiquent les orifices des nerfs crâniens (V, VII, X-XI et XII).

Le surangulaire (figure 5) est un os de la mâchoire inférieure participant à l'articulation de celle-ci avec le crâne. Il est constitué de deux processus : le **processus coronoïde\*** orienté antérodorsalement et le **processus rétroarticulaire\*** orienté postérieurement. Sur le spécimen CM.351 (figures 5A-B), ce second processus a subi une forte déformation, antéropostérieurement et médiolatralement. La partie conservée permet tout de même des comparaisons avec des découvertes faites à Vitrolles (Pincemaille-Quilleveré, 2002 ; figures 5C-E) et en Roumanie telles que *Zalmoxes robustus* (Weishampel et al., 2003; figures 5F-G). De manière générale, la forme du spécimen de BRH1 est plus proche de celle de *Zalmoxes* que du spécimen de Vitrolles.

Au niveau du **glénoïde\*** pour l'articulation du condyle latéral de l'**os carré\***, le surangulaire présente deux structures. D'un part, la proéminence latérale qui prend la forme d'une langue triangulaire orientée postérieurement. Sur le spécimen de Vitrolles cette structure est plus robuste et moins développée et a une forme de petite excroissance cylindrique. Chez *Zalmoxes*, la proéminence latérale est beaucoup plus large antéropostérieurement et peu développée latéralement. D'autre part, le surangulaire présente une autre légère proéminence correspondant à la surface de contact avec l'os **préarticulaire\***. Cette surface de forme ovale présente un contour bien marqué. Cette structure est beaucoup moins développée chez *Zalmoxes*, tandis qu'elle ne se distingue pas du corps de l'os sur le spécimen de Vitrolles. Le surangulaire de BRH1 présente deux foramina bien visibles sur les faces latérale et médiale (dans la **fosse adductrice\***). Il n'est pas possible de définir lequel des deux est le foramen surangulaire (Weishampel et al., 2003). Sur le spécimen de Vitrolles, ces foramina ne sont visibles que sur la face latérale du fait de la mauvaise préservation médiale de l'os (figure 5C). Chez *Zalmoxes* un unique foramen (qualifié de « surangulaire » par Weishampel et al., 2003) est visible sur le processus coronoïde en vue latérale (figures 5F-G). Deux foramina sont également visibles médialement, dans la fosse adductrice (figure 5B).

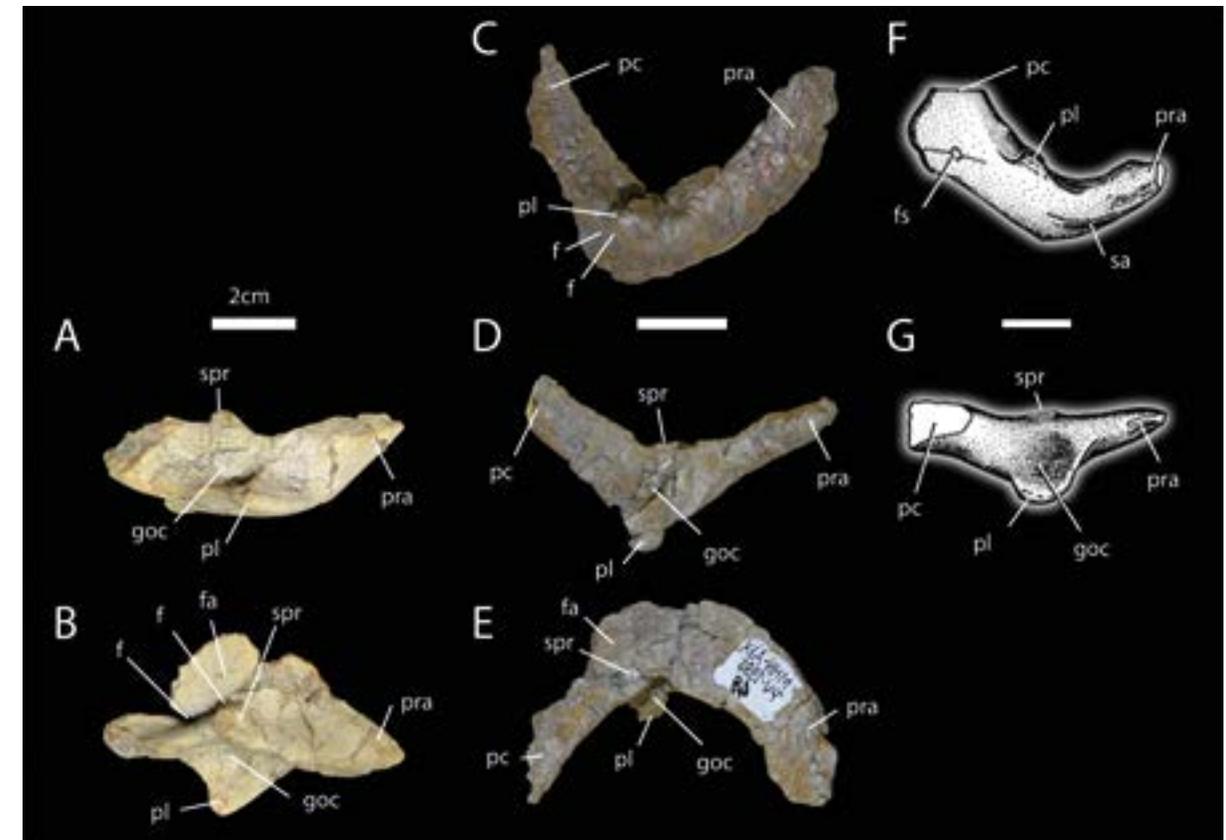


Figure 5 : Surangulaire de Rhabdodon CM.351 (A-B) découvert sur la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, dans le secteur de Roques-Hautes BRH1, en comparaison de ceux attribués à Rhabdodon priscus (C-E : MHNAIX-PV.1995.049, inversé, Pincemaille-Quilleveré, 2002) et à *Zalmoxes robustus* (F-G : BMNH R.3390, inversé, Weishampel et al., 2003), en vues dorsales (A, D, G), médiales (B, E) et latérales (C-F). Abréviations : f = foramen ; fa : fosse adductrice ; fs = foramen surangulaire ; goc = glénoïde pour le condyle latéral de l'os carré ; pc = processus coronoïde ; pl = proéminence latérale ; pra = processus rétroarticulaire ; sa = suture avec l'angulaire ; spr = surface de contact avec l'os préarticulaire.

Les vertèbres retrouvées (CD13-Pal.2019.2.4.3 et D13-Pal.2019.2.4.4) de l'individu 1, ne permettent pas d'étude poussée. L'absence de cavités latérales (pleurocèles) et les surfaces articulaires plates (platycœles) des **centra\*** écartent toute confusion avec un autre dinosaurien ou crocodile local. L'absence d'arête latérale exclut une position parmi les vertèbres caudales. La forme générale des centra évoque des vertèbres dorsales ou pré-sacrées (précédant immédiatement le sacrum). La découverte d'os du bassin : deux pubis (CD13-Pal.2019.2.4.1 et CD13-Pal.2019.2.4.6) et un ilion (CD13-Pal.2019.2.4.2), conforte cette dernière hypothèse.

L'ilion droit CD13-Pal.2019.2.4.2 (figure 6A) est incomplet, n'étant constitué que de sa partie antérieure (précétabulaire). La comparaison de l'ilion avec un autre spécimen provençal plus complet (CM-635 de Fox-Amphoux – La Bastide Neuve), ne montre pas de différence notable. En revanche, il est proportionnellement plus long et plus courbé ventralement qu'un spécimen provenant de l'Aude (MDE-D.157.28). Cette morphologie diffère fortement de celles observées chez *Zalmoxes*. Chez *Z. robustus* et *Z. shqiperorum*, les processus précétabulaires sont droits, orientés antérieurement, relativement graciles, avec une longueur très variable (Weishampel *et al.*, 2003 ; Godefroit *et al.*, 2009). Un spécimen de *Z. shqiperorum* présente un processus précétabulaire fortement courbé ventralement mais il s'agirait vraisemblablement d'une déformation (Weishampel *et al.*, 2003).

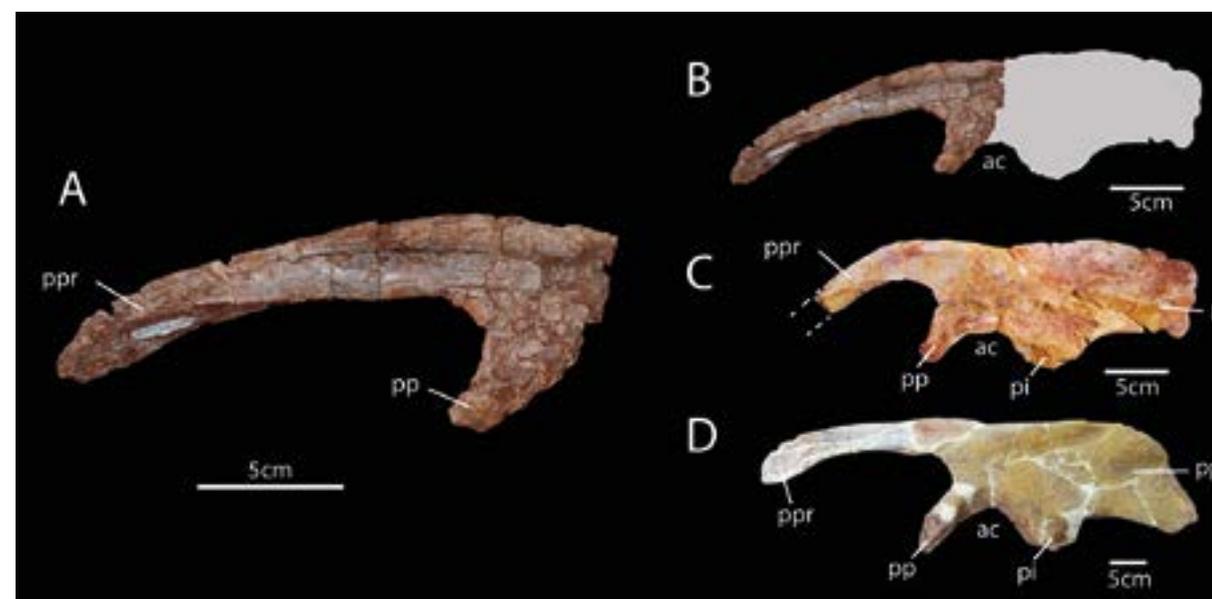


Figure 6 : Ilium droits de *Rhabdodon* découverts sur le secteur BGC3.03 (A-B : CD13-Pal.2019.2.4.2), Fox-Amphoux – Bastide Neuve, Var (D : CM-635 ; Chanthasit, 2010) et à Bellevue, Aude (C : MDE-D.157.28, inversé horizontalement d'après Chanthasit, 2010) en vues médiales (A-C) et latérale (D). Abréviations : ac = acétabulum\*, pi = pédoncule ischiatique\*, pp = pédoncule pubien\*, ppo = processus postacétabulaire\*, ppr = processus précétabulaire.

Les pubis CD13-Pal.2019.2.4.6 et CD13-Pal.2019.2.4.1 (figure 7A-B) sont incomplets et ne conservent que les parties proximales (en connexion avec l'ilion et l'ischion) et la partie proximale du **processus pré-pubien\***. Les deux os découverts côte-à-côte, de dimensions similaires et complémentaires (droit et gauche), confirment l'appartenance très vraisemblable à un seul et même individu (individu 1).

Comprimés médiolateralement et de constitution robuste, ces deux éléments sont très similaires à un pré-pubis découvert à Fox-Amphoux – Bastide Neuve (CM.630). En effet, ces trois os partagent un foramen obturateur en forme d'amande, avec un grand axe oblique (orientation antérodorsale–postéroventrale) et positionné ventralement. La bordure ventrale de ces pré-pubis présente une concavité marquée, accentuée par la portion périphérique ventrale du foramen obturateur. Bien qu'incomplet le processus pré-pubien de ces trois os montre une forme courbée ventralement. Cette morphologie générale se distingue nettement de celles observées sur les spécimens de Vitrolles – Couperigne (MHNAix-PV.2007.4.7 et .12) et de Rennes-le-Château (MDE-C3.04.95), dans l'Aude.

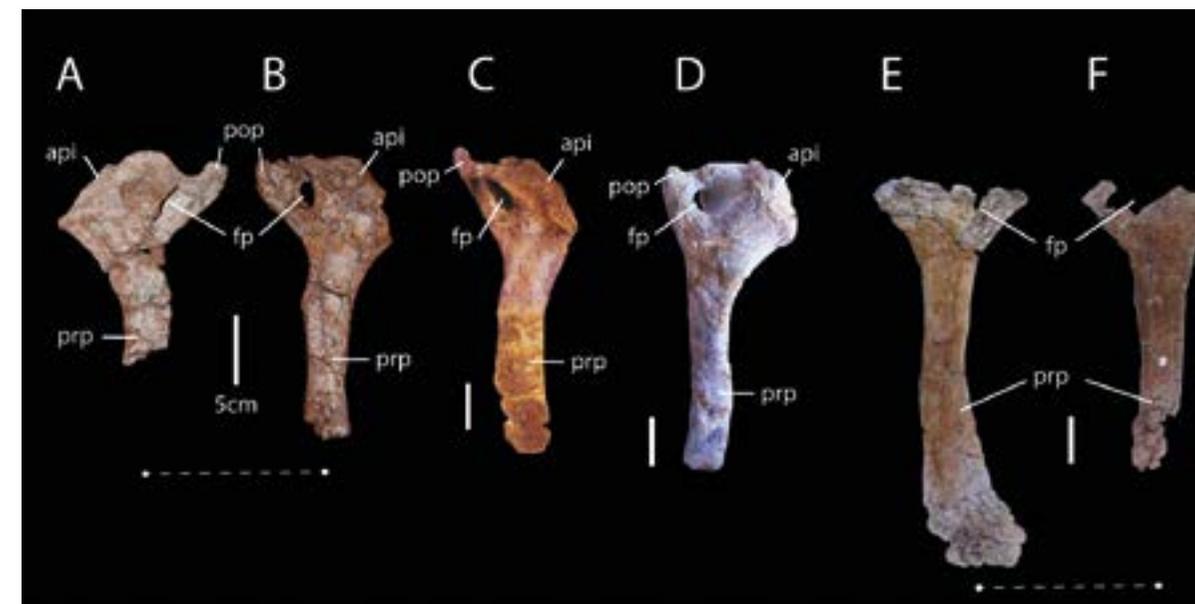


Figure 7 : Pré-pubis de *Rhabdodon* découverts sur la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire (A : CD13-Pal.2019.2.4.6, B : CD13-Pal.2019.2.4.1), à Fox-Amphoux – Bastide-Neuve, Var (B : CM.630), à Rennes-Le-Château, Aude (D : MDE-C3.04.95) à Vitrolles – Couperigne, Bouches-du-Rhône (E : MHNAix-PV.2007.4.7, F : MHNAix-PV.2007.4.12) et en vues médiale (B) et latérale (C). Les tirets indiquent les paires de pubis d'un même individu. Abréviations : api : surface articulaire pubiliaque ; fp = foramen obturateur ; pop = processus post-pubien, prp = processus pré-pubien.

Le tibia de *Rhabdodon* (CD13-Pal.2019.4.1.1) correspondant à l'« individu 2/3 » (figure 8) est connu par un élément gauche mal conservé, ne permettant qu'une description générale et des comparaisons limitées. Il s'agit d'un os robuste avec un important élargissement de l'extrémité distale. Tout comme pour le matériel type de *Rhabdodon priscus* (Matheron, 1869), le tibia découvert sur la réserve naturelle, est proportionnellement plus court et plus robuste que le spécimen (MDE-C3.1189) découvert dans l'Aude (Chanthasit, 2010) et que ceux attribués aux deux espèces de *Zalmoxes* (Weishampel *et al.*, 2003 ; Godefroit *et al.*, 2009). La **crête cnémiale\*** est robuste et peu développée. En vue proximale, le contour de l'os est triangulaire avec un condyle latéral peu développé et pointant postérieurement. Le condyle interne (ou médial) forme une robuste expansion triangulaire, orientée proximopostérieurement. L'extrémité distale est triangulaire du fait de l'orientation des malléoles médiale (ou interne) et latérale (ou externe). La malléole interne a une orientation médiolaterale tandis que la malléole externe s'oriente latéralement. En vue distale, le tibia a une forme subtriangulaire, avec une surface antérieure qui est fortement convexe, avec un relief marquant la surface de contact avec l'astragale (non conservé). La surface postérieure est faiblement convexe. Bien que très mal conservée, la surface postérieure de l'extrémité distale ne semble pas porter d'arête centrale comme chez *Zalmoxes* FGGUB.R.0008 (Weishampel *et al.*, 2003) ou sur le matériel holotypique MHNM.6034.12079.

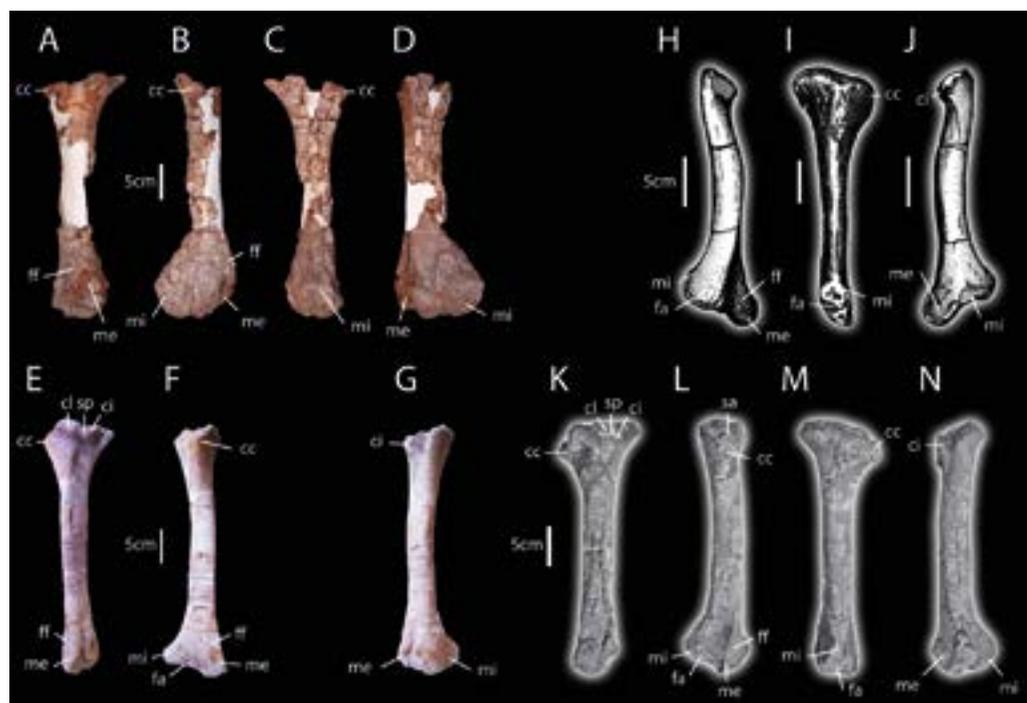


Figure 8 : Tibia gauche de *Rhabdodon* (CD13-Pal.2019.4.1.1) découvert sur le secteur BGC3.03 (A-D) en comparaison de tibias de *Rhabdodon* cf. *priscus* (MDE-C3.1.189, inversé, Chanthasit, 2010) provenant de Bellevue, Aude (E-G), de *Zalmoxes robustus* provenant de Roumanie (H, J : FGGUB-R.0008 inversé ; I : MCDRD.291 inversé, Weishampel et al., 2003) et de *Zalmoxes shqiperorum* (K-N : UBB.NVZ3, Godefroit et al., 2009), en vues latérales (A, E, K), antérieures (B, F, H, L), médiales (C, I, M) et postérieures (D, G, J, N). Abréviations : cc = crête cnémiale ; ci = condyle interne ; cl = condyle latéral ; fa = facette articulaire de l'astragale ; ff = facette articulaire de la fibula ; me = malléole externe ; mi = malléole interne ; sa = sillon antérieur ; sp = sillon plopité.

#### 4.4. QU'APPORTENT LES DÉCOUVERTES DE RHABDODON FAITES SUR LA RÉSERVE NATURELLE

Bien que le genre *Rhabdodon* soit le dinosaurien le plus connu en termes de quantité d'ossements, de complétude de squelette et de nombre de gisements concernés par sa présence, de nombreuses questions demeurent persistantes quant à sa variabilité (spécifique, ontogénétique ou sexuelle). La précédente révision menée sur tout le Sud de la France (Aude, Hérault, Bouches-du-Rhône et Var) n'avait fait qu'effleurer cette problématique, se concentrant sur l'ostéologie générale du genre (Chanthasit, 2010). Ce travail mettait en évidence la présence d'au moins trois formes : *Rhabdodon priscus*, *Rhabdodon septimanicus* et cf. *Rhabdodon septimanicus*. La mise au jour de *R. priscus* et *R. septimanicus* sur le même gisement de Trets - La Boucharde (Allain et Pereda Suberbiola, 2003) suscita un réel questionnement de la variabilité sexuelle possible au sein de ce genre. Malheureusement, Chanthasit fit l'impasse sur cette information. À ces découvertes s'ajouta la forme « naine » confirmée d'une analyse histologique d'un fémur provenant du Var (Ősi et al., 2012). L'ensemble de ces études souffre d'un point commun : l'absence de comparaisons directes avec le matériel type de *Rhabdodon priscus*, dont les éléments étaient, jusqu'à très récemment, en partie inaccessibles au Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille. En fait, toutes ces études se basaient uniquement sur la description du spécimen de Vitrolles - Couperigne par Pincemaille-Quillevéré (2002) qui, elle-même, n'avait effectué que très peu de comparaisons avec le matériel type.

La révision du matériel type entreprise par l'un de nous (T. T.) et l'ensemble des données publiées, auxquelles s'ajoutent les nombreuses découvertes effectuées ces dernières années par le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, incluant celles de la réserve naturelle, permettent une nouvelle révision de ce genre (Tortosa, 2014 ; étude en cours). Ce travail, permet déjà de rapprocher les découvertes de la réserve naturelle de celles de Fox-Amphoux - Bastide Neuve. Les quelques ossements mis au jour ont l'avantage d'avoir livré les premiers éléments crâniens de ce dinosaurien dans les Bouches-du-Rhône et de confirmer, grâce à la découverte de l'individu 1, que les éléments **pelviens\*** (ilion, pubis), très proches de ceux découverts à Fox-Amphoux, appartenaient bien au même genre et très certainement à la même espèce. Le matériel varois ayant été rapporté par Matheron, lui-même, à *Rhabdodon priscus*, puis confirmé par la révision de Chanthasit (2010), nous maintenons donc cette détermination. Les découvertes effectuées depuis 2015 sur la réserve naturelle permettront d'approfondir les comparaisons et de statuer sur la variabilité morphologique de ce genre (et feront l'objet d'un prochain volume des Cahiers de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire).

## 5. LES TITANOSAURIENS, LES GÉANTS DU CRÉTACÉ

### 5.1. LES DÉCOUVERTES DE TITANOSAURIENS EN PROVENCE

Les titanosauriens sont des dinosauriens **saurischiens\*** sauropodes. Cette famille de « lézards titanesques » inclut quelques-uns des plus gros animaux terrestres découverts à ce jour (*Argentinosaurus*, *Puertasaurus*...). Ils sont également les derniers dinosauriens à long cou à avoir survécu jusqu'à la fin du Crétacé, en remplaçant progressivement les autres familles de sauropodes. Leur répartition biogéographique fut mondiale (exceptée en Antarctique où les recherches demeurent extrêmement limitées). L'une des premières mentions d'une découverte de titanosauriens en Provence est peut-être celle signalée par Coquand (1839) à propos de fémurs de « Mastodontes » mis au jour dans la vallée du Val (synclinal du Val, secteur de Brignoles, Var). Il décrit des os de plus de 70 cm de long pour 25 cm de diamètre provenant des niveaux de grès comparables à ceux de Trets, Mimet et des Pennes-Mirabeau. Ces ossements se sont malheureusement évanouis au gré des dons successifs de la collection de Coquand. Quelques années après, Panescorse et Doublier présentèrent la découverte d'ossements de sauriens gigantesques provenant des secteurs de Fox-Amphoux et d'Aups (Doublier, 1842) sans en donner de description détaillée. C'est Matheron qui, après avoir décrit le « saurien gigantesque » *Hypselosaurus priscus* provenant de Rognac (Matheron, 1869b), confirma que les précédentes découvertes foxoises étaient comparables (Matheron 1891). D'autres détails et anecdotes paléontologiques varoises concernant cette période ont pu être recensés par Méchin (2017).

Durant la première moitié du 19<sup>e</sup> siècle, de Lapparent (1947) entreprit la révision des dinosauriens du Sud de la France et mena une fouille systématique des gisements de Fox-Amphoux (Basségat et Métiesson). Il réétudia les collections Matheron et Panescorse. S'appuyant sur les travaux de Depéret (1900), il reconnut deux formes de titanosaures en Provence : *Hypselosaurus priscus* et *Titanosaurus indicus*. Les deux espèces provençales furent par la suite considérées comme des noms douteux (Le Loeuff, 1993 ; Wilson et Upchurch, 2003), d'où l'utilisation actuelle de guillemets lors de la mention de leur nom scientifique. À la fin des années 1980, les sites de Fox-Amphoux (Métiesson et Bastide-Neuve) furent fouillés par les paléontologues amateurs Annie et Patrick Méchin. La découverte d'un arrière-crâne provenant de Fox-Amphoux - Métiesson ne permit pas d'identifier précisément un taxon du fait de son mauvais état de conservation (Le Loeuff et al., 1989).

À la fin des années 1990, dans les Bouches-du-Rhône cette fois, le gisement de Trets - La Boucharde fut découvert et livra ce qui pourrait être un des titanosaures les plus complets de Provence (Allain, 1997). Cette découverte, susceptible d'être un nouveau taxon ne fut jamais publiée scientifiquement. Durant cette même période, le Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence (MHNA) effectua des fouilles sur le gisement varois de Pourrières - Les Eyssarettes. Un squelette partiel de titanosaurien fut découvert (vertèbres, éléments **appendiculaires\*** antérieurs, pelviens et appendiculaires postérieurs). Cette découverte, la plus complète de Provence jusqu'à la fin des années 2000 ne reçut aucun intérêt de la part des spécialistes. La fin des années 1990 est marquée par la découverte du gisement de Velaux - Bastide Neuve, où sont mis au jour *Atsinganosaurus velauciensis* et *Garrigatitan meridionalis* (Garcia et al., 2010 ; Díez Díaz et al., 2018, 2020).

Dans les années 2000, le MHNA entreprit de nouvelles fouilles à Fox-Amphoux - Métisson et ramena plusieurs dizaines d'éléments isolés, dont l'arrière-crâne le plus complet découvert en Provence. Les résultats de ces fouilles ne furent étudiés qu'il y a quelques années (Tortosa, 2014). Ce même gisement fut également exploité par l'Association de Recherches Paléontologiques du Var (ARPV). Bien que les découvertes fussent nombreuses, seuls deux arrières-crânes et quelques dents de titanosaures indéterminés furent publiés (Díez Díaz *et al.*, 2012). À partir de 2005, le MHNA, en collaboration avec la société autoroutière ESCOTA (VINCI Autoroutes), mit au jour une quantité importante d'éléments bien conservés lors de fouilles menées le long de l'autoroute A8. Ces découvertes effectuées sur les gisements de Rousset - La Cairanne, de Rousset - Autoroute 3, de Pourrières - Jas Neuf Autoroute (trois sites), de Pourrières - Autoroute Nord/Sud et de Pourcieux - Autoroute sont constituées d'au moins trois individus partiellement conservés. La préparation du matériel prit plusieurs années et quelques-unes des plus belles pièces n'ont été étudiées que très récemment et seront publiées prochainement (Tortosa, 2014). D'autres découvertes furent effectuées ponctuellement en Provence comme sur le gisement de Jouques - Révelette 3 qui livra quelques éléments provenant de niveaux calcaires lacustres. La difficulté de la préparation de ces ossements fit que les éléments plus intéressants ne furent disponibles à l'étude que très récemment. Enfin, les fouilles entreprises par le MHNA sur le site de Beaurecueil - Grands-Creux 3 en 2010/2011 sont les dernières à avoir livré des ossements de titanosauriens où quelques restes appendiculaires furent récoltés. À l'heure actuelle, deux espèces sont considérées comme valides en Provence : *Atsinganosaurus velauciensis* et *Garrigatitan meridionalis* (voir encarts 6 et 7). Trois autres titanosauriens s'ajoutent à la liste de taxons identifiés sur l'île Ibéro-armoricaine (dont faisait partie la Provence) au Crétacé supérieur : *Ampelosaurus* (Aude et possiblement en Espagne ; encart 5), *Lirainosaurus* (Espagne et possiblement dans le Var ; encart 8) et *Lohuecotitan* (Espagne ; encart 9). Ces découvertes récentes indiqueraient une diversité taxinomique bien plus importante que celle actuellement estimée (Vila *et al.*, 2012 ; Tortosa, 2014 ; Díez Díaz *et al.*, 2020).

#### Encart 5 : Diagnose d'*Ampelosaurus atacis* :

La diagnose émendée d'*Ampelosaurus atacis* (par Le Loeuff, 2005) en fait un Titanosauria caractérisé par :

- des dents :
  1. dont la couronne est cylindrique avec des extensions antérieure et postérieure,
  2. dont la couronne présente une constriction à sa base,
- des vertèbres cervicales postérieures :
  3. possédant une **lame spinale\*** accessoire,
- des vertèbres dorsales :
  4. portant une **lame centroparapophysaire\*** postérieure très développée,
  5. possédant une lame accessoire très développée entre la **postzygapophyse\*** et la **lame centrodiapophysaire\*** postérieure,
  6. pourvues d'une épine neurale orientée vers l'arrière,
- un sacrum :
  7. comportant deux **vertèbres sacro-caudales\***,
- les trois premières vertèbres caudales :
  8. procœles avec des **prézygapophysies\*** allongées,
- des scapulas :
  9. possédant une **lame scapulaire\*** non évasée distalement.

#### Encart 6 : Diagnose d'*Atsinganosaurus velauciensis* :

La diagnose émendée d'*Atsinganosaurus velauciensis* (par Díez Díaz *et al.*, 2018) en fait un Titanosauria caractérisé par :

- des vertèbres cervicales antérieures et moyennes :
  1. sans pleurocèle,
- des vertèbres cervicales postérieures :
  2. présentant un rapport « longueur antéropostérieure/hauteur de la face articulaire postérieure » supérieur à 3,
- des ulnas :
  3. portant un processus olécrane\* proéminent, se développant au-delà de la surface articulaire proximale,
- des ilions :
  4. possédant un pédoncule pubien présentant une surface postérieure concave sur sa moitié distale, encadrée de deux arêtes saillantes.

#### Encart 7 : Diagnose de *Garrigatitan meridionalis* :

*Garrigatitan meridionalis* (Díez Díaz *et al.*, 2021) est un Titanosauria possédant des **autapomorphies\*** (marquées par « (a) ») et une combinaison unique de caractères incluant :

- des cervicales dorsales :
  1. possédant un large canal neural ;
  2. munies d'une épine neurale antéropostérieurement comprimée et en forme de pagaie (pas plus large que le centrum) ;
  3. présentant des postzygapophysies bien séparées avec des surfaces articulaires orientées ventralement ;
- des humérus :
  4. en forme de sablier (les extrémités proximales et distales de même largeur) en vues antérieures et postérieures (a).
- des ilions :
  5. présentant une large dépression arrondie légèrement postérieurement à la base du pédoncule pubien (a).
- des fémurs :
  6. possédant une marge proximolaterale légèrement orientée médialement (a).

**Encart 8 : Diagnose de *Lirainosaurus astibiae* :**

La diagnose émodée de *Lirainosaurus astibiae* (par Díez Díaz *et al.*, 2013a-b) en fait un Titanosauria caractérisé par :

- un os **basioccipital\*** :
  1. possédant un foramen sur la surface distale de chaque **tubérosité\***,
  2. sans foramen subcondyloire médian, entre les tubérosités basales,
- des vertèbres caudales antérieures :
  3. portant une lame dans la **fosse interzygapophysaire\***,
- des vertèbres caudales postérieures :
  4. ne possédant pas de **lame spinopostzygapophysaire\*** projetée en arrière,
- des **plaques sternales\*** :
  5. pourvues d'une arête antéroventrale,
  6. possédant un processus antérolatéral et une bordure latérale concave.
- des scapulas :
  7. dont la surface médiale de la lame scapulaire possède une proéminence dorsale et, parfois, une arête ventrale.
- des ischions :
  8. dont la diaphyse n'est pas élargie,
- des ostéodermes :
  9. nombreux et incluant des épines.

**Encart 9 : Diagnose de *Lohuecotitan pandafilandi* :**

*Lohuecotitan pandafilandi* (Diez Díaz *et al.*, 2016) est un Titanosauria possédant des autapomorphies\* (marquées par « (a) ») et une combinaison de caractères incluant :

- des vertèbres dorsales :
  1. présentant une courte lame postspinale avec une extrémité distale élargie transversalement représentée par de légères marques,
- des vertèbres dorsales antérieures et moyennes :
  2. possédant une lame centrodiaophysaire postérieure s'évasant dorsalement et ventralement (parfois bifurquée) (a),
- des vertèbres caudales les plus antérieures :
  3. portant une lame médiale spinoprézygapophysaire\* et une lame spinopostzygapophysaire connectées ventralement et respectivement aux lames préspinale et postspinale\*,
- des vertèbres caudales antérieures :
  4. munies d'une épine neurale portant une projection dorsale des lames préspinale et postspinale, résultant en un contour en forme de « V » en vue latérale (a),
  5. dont l'épine neurale est en forme de « + » en coupe (a),
- des vertèbres caudales moyennes :
  6. présentant deux renflements sur la bordure dorsale de l'articulation postérieure et s'étendant sur la surface dorsale du centrum (a),
- des chevrons\* postérieurs :
  7. possédant des branches dont les extrémités articulaires sont chacune d'entre elles divisées en deux surfaces articulaires (a),
- des fibulas :
  8. portant une tubérosité entre les trochanters\* antérieur et latéral.

## 5.2. LES DÉCOUVERTES DE TITANOSAURIENS FAITES SUR LA RÉSERVE NATURELLE

Les ossements mis au jour sur la réserve naturelle lors des campagnes 2010-2011 sont très fragmentaires, isolés, mal conservés et correspondent uniquement à des éléments de squelettes appendiculaires (constituant les membres). Ils proviennent de deux horizons fossilifères différents et pourraient représenter trois individus distincts (dont deux extraits de la même couche).

Une scapula fragmentaire (CD13-Pal.2019.2.2a-b, figure 9) est sûrement l'élément le plus intéressant. Elle est constituée de deux fragments : le processus d'acromion et la lame scapulaire. De par la longueur de la lame scapulaire et la forme de ses bordures, la morphologie de cette scapula se rapproche plutôt d'*Atsinganosaurus* (Díez Díaz *et al.*, 2018), du spécimen de Pourrières – Jas Neuf Autoroute 1 dans le Var (Tortosa, 2014), et dans une moindre mesure de celle d'un titanosaurien indéterminé provenant de Fox-Amphoux – Métiçon dans le Var (Lapparent, 1947). Ces spécimens provençaux présentent une lame assez courte, aux bordures parallèles, avec un évasement distal très limité. Le spécimen de la réserve naturelle et celui de Pourrières – Jas Neuf Autoroute Sud présente la même légère déflexion ventrale de l'extrémité de la lame scapulaire. Le spécimen de la réserve naturelle présente une légère sinuosité que l'on retrouve, plus marquée, chez *Ampelosaurus* (Le Loeuff, 2005). Cependant, chez ce dernier elle présente une morphologie générale très différente des autres taxons français (longue et sinueuse) en étant beaucoup plus proche de celle de *Lirainosaurus* (Díez Díaz *et al.*, 2013b). La lame scapulaire du spécimen CD13-Pal.2019.2.2a ne porte pas de crête comme chez *Atsinganosaurus* et *Magyarosaurus* BMNH.R.3816 (Díez Díaz *et al.*, 2013b). Ceci diffère de *Lirainosaurus* MCNA.14461 (Díez Díaz *et al.*, 2013b) qui en possède deux (ventrale et dorsale) et *Ampelosaurus* (Le Loeuff, 2005) qui ne possède qu'une crête (ventrale). Le spécimen de la réserve naturelle et celui de Pourrières – Jas Neuf Autoroute présentent une légère boursoufflure à la base de la lame scapulaire près de la bordure dorsale. *Atsinganosaurus* ne possède pas ce renflement (Díez Díaz *et al.*, 2018). En coupe, la lame scapulaire présente un épaississement de sa bordure ventrale, notamment au niveau de la jonction avec le corps scapulaire lui donnant une coupe triangulaire en section. Ceci diffère des sections en forme de « D » observées chez *Lirainosaurus* (Díez Díaz *et al.*, 2013b).

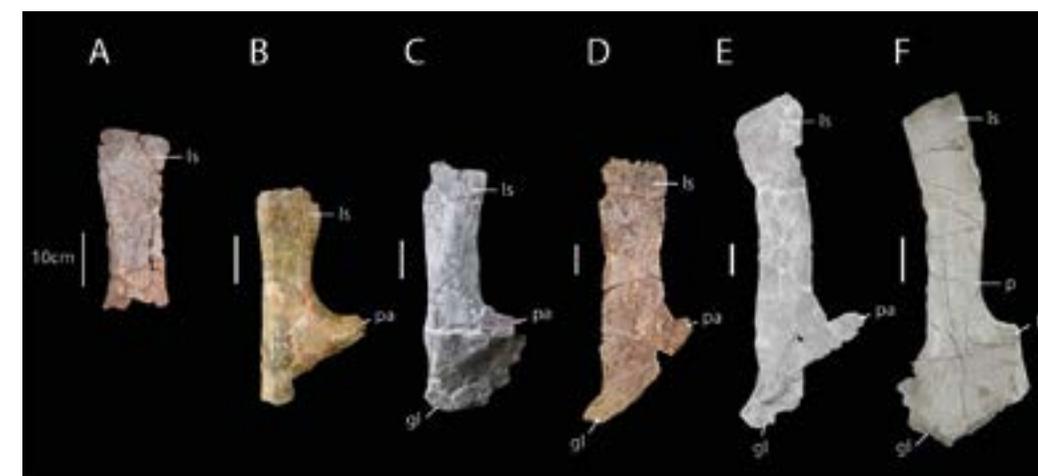


Figure 9 : Scapula gauche (CD13-Pal.2019.2.2a) d'un titanosaurien indéterminé provenant du secteur BGC3.01 (A) en comparaison de celles de titanosauriens indéterminés provenant de Fox-Amphoux, Var (B : MNHN sans numéro, inversé, Lapparent, 1947), de Pourrières – Jas Neuf Autoroute 1, Var (C : MHNAix-PV.2008.1.41, Tortosa, 2014), d'*Atsinganosaurus* (D : MMS/VBN.93.11, Díez Díaz *et al.*, 2018), d'*Ampelosaurus* (E : MDE-C3.1043, Le Loeuff, 2005) et de *Lirainosaurus* (F : MCNA.14461, inversé, Díez Díaz *et al.*, 2013b), en vues latérales (A-E) et ventrale (F). Abréviations : gl = fosse glénoïde ; ls = lame scapulaire ; p = proéminence dorsale ; pa = processus acromion.

Une ulna gauche (CD13-Pal.2019.2.3 ; figure 10A) a été découverte sur le secteur BGC3.01. L'os est incomplet et de petite taille (19 cm). C'est un os gracile avec une extrémité proximale très évasée bien qu'elle soit en partie manquante. En vue proximale, l'os présente un contour triradié caractéristique. Le processus olécrane est manquant. L'élargissement est dû à l'important développement du processus antéromédial. Le processus antérolatéral, peu développé par rapport au précédent, ne semble pas se prolonger loin distalement sur la diaphyse. C'est également le cas chez *Atsinganosaurus* et *Ampelosaurus* (seulement sur le spécimen MDE-C3.1296) mais pas chez *Garrigatitan* (Díez Díaz *et al.*, 2013b) et *Lirainosaurus* (Díez Díaz *et al.*, 2013b). La variabilité de forme de l'ulna semble être importante chez *Ampelosaurus* (Le Loeuff, 2005). Un rapprochement avec la découverte de la réserve naturelle est donc délicat. De manière générale sa morphologie gracile le rapproche davantage d'*Atsinganosaurus* (Díez Díaz *et al.*, 2018) mais il est proportionnellement beaucoup plus court et plus évasé.

Un fragment d'os long (CD13-Pal.2019.2.1), découvert à proximité de l'ulna précédemment décrite, fut initialement interprété comme étant une autre ulna de plus grande taille. En coupe, la forme trapézoïdale rappelle effectivement cet os. La présence de l'ulna et de la scapula précédemment décrites, en immédiate proximité, pourrait également orienter la détermination vers un fragment d'humérus, dont la taille complète théorique serait plus cohérente.

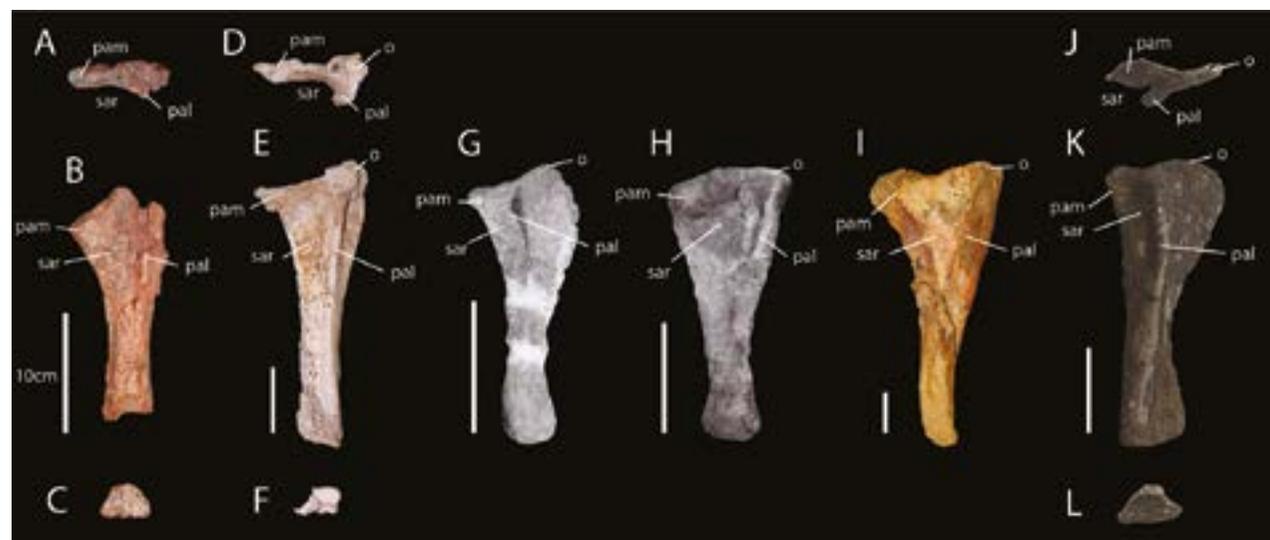


Figure 10 : Ulna gauche d'un titanosaurien indéterminé (A-C : CD13-Pal.2019.2.3.1) provenant de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, secteur BGC3.01, en comparaison avec *Atsinganosaurus* (D-F : MMS/VBN.12.P.06a, inversé, Díez Díaz *et al.*, 2018), *Ampelosaurus* (G : MDE-C3.1296, H : MDE-C3.1490, inversés ; Le Loeuff, 2005), *Garrigatitan* (I : MMS/VBN.09.A.017 ; inversé, Díez Díaz *et al.*, 2020) et *Lirainosaurus* (J-L : MCNA.3157, inversé, Díez Díaz *et al.*, 2013b), en vues proximales (A, D, J), latérales (B, E, G, H, I, K) et distales (C, F, L). Abréviations : pal = processus antérolatéral, pam = processus antéromédial, ol = olécrane, sar = surface pour l'articulation du radius.

Deux fibulas ont été découvertes (figure 11). La première fibula (CD13-Pal.2017.3.1 ; figure 11A) de la « Collection Lavigne » est très fragmentaire et ne conserve qu'une portion de la diaphyse, très gracile, se situant au niveau de la tubérosité latérale (surface d'insertion du muscle *m. iliofibularis*). Sa section transversale à mi-longueur est subcirculaire et la tubérosité latérale se présente sous forme d'une surface plane arrondie. Bien que détériorée, la surface médiale semble présenter un contour convexe proche de ce que l'on observe chez *Lohuecotitan* (Díez Díaz *et al.*, 2013b). Ce morphotype se distingue de la seconde fibula (CD13-Pal.2019.5.1 ; figure 11B).

Cette dernière est toute aussi incomplète mais est de plus grande taille. La diaphyse présente une coupe transversale ovale proximale (aplatissement médiolatéral) tout comme chez « *Hypselosaurus* » (MHN.6034.11997.1), et les spécimens de Fox-Amphoux – Mëtisson (MHN.2001.28 ; MHN.6034.11886). La surface latérale est légèrement convexe, ce qui rapproche ce morphotype de ceux découverts à Fox-Amphoux – Mëtisson (MHN.2001.28, MHN.6034.11886 et .12038). Tout comme chez *Ampelosaurus*, *Atsinganosaurus*, *Lirainosaurus*, la surface médiale est légèrement concave (Le Loeuff, 2005 ; Díez Díaz *et al.*, 2013b, 2018). Toute autre comparaison avec les taxons cités est impossible.

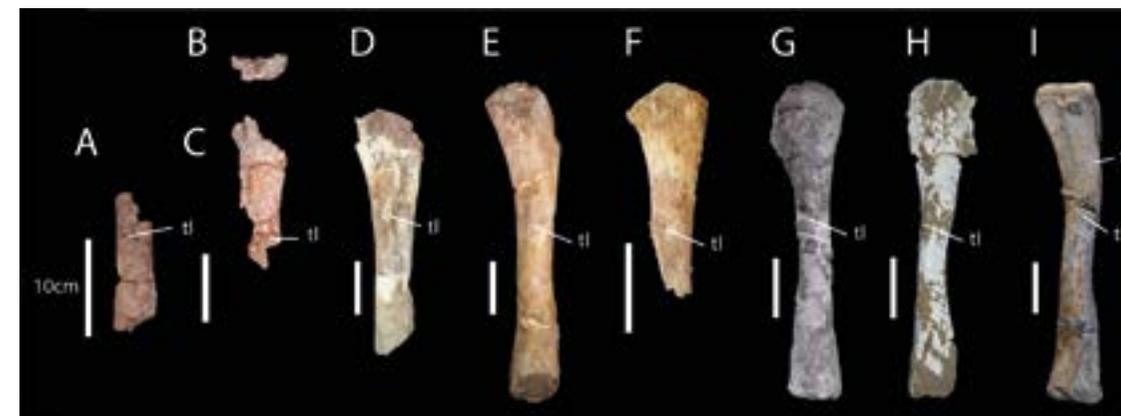


Figure 11 : Fibulas droites de titanosauriens indéterminés provenant de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire, de la « Collection Lavigne » (A : CD13-Pal.2017.3.1) et du secteur BGC3.05 (B-C : CD13-Pal.2019.5.1), en comparaison avec « *Hypselosaurus* » (D : MHN.6034.11997.1), un titanosaurien indéterminé de Fox-Amphoux, Var (E : MHN.6034.11886), *Atsinganosaurus* (F : MMS/VBN.09.132, inversé, Díez Díaz *et al.*, 2018), *Ampelosaurus* (G : MDE-C3-48, inversés ; Le Loeuff, 2005) et *Lirainosaurus* (H : MCNA.9410, Díez Díaz *et al.*, 2013b) et *Lohuecotitan* (I : HUE-03087), en vues latérales (A-, C-H) et proximale (B). Abréviations : ta = trochanter antérieur accessoire ; ti = trochanter latéral.

### 5.3. QU'APPORTENT LES DÉCOUVERTES DE TITANOSAURIENS FAITES SUR LA RÉSERVE NATURELLE ?

La mise au jour de titanosauriens sur la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire est actuellement plus symbolique que réellement informative. Tout comme pour les autres découvertes provençales, les titanosauriens restent encore largement méconnus car très majoritairement représentés par des fossiles isolés et fragmentaires. Les ossements mis au jour sur la réserve naturelle confirment cette tendance. Pour l'heure, il est délicat de rapporter ces restes à l'un des taxons connus en Provence ou plus largement du Sud de la France et du Nord de l'Espagne. Les affinités possibles avec le spécimen de Pourrières – Jas Neuf Autoroute 1, avec *Atsinganosaurus*, ou bien même avec *Ampelosaurus*, devront être confirmées avec de nouvelles découvertes. Hormis la scapula, les autres ossements présentent une importante variabilité morphologique, comme ceci est également observé chez *Ampelosaurus* et *Lirainosaurus*. Les spécimens provenant de la réserve naturelle ne permettent donc pas de savoir si ces différences de morphotypes sont dues à une différence taxinomique ou ontogénétique. Ces découvertes demeurent donc attribuées à des titanosaures indéterminés.

## 6. CONCLUSION

L'essentiel de la faune dinosaurienne mis au jour dans les différents bassins sédimentaires du Campanien et Maastrichtien de Provence indique une grande abondance de titanosauriens et de rhabdodontidés alors que les droméosauridés et abélisauridés sont moins communs, et que les nodosauridés sont rares (Tortosa, 2014). A l'issue des fouilles menées en 2010 et 2011, les gisements de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire n'ont livré que les deux herbivores les plus fréquents, *Rhabdodon* et un titanosaurien indéterminé, ainsi que le petit carnivore *Variraptor* (figure 12).

Il est à noter qu'en dépit de la très courte durée de fouilles et du faible effort de recherche, pas moins de six points fossilifères furent mis au jour sur une surface assez réduite de 600 m<sup>2</sup>. Il s'agit donc d'une indication très favorable pour la découverte de nouveaux ossements dans les siltites de la réserve naturelle, bien plus riches que prévu. Cette indication potentielle de richesse fut confirmée en 2015 lors des nouvelles fouilles méthodiques menées sur le site BGC2.2. Depuis, de très nombreux restes de dinosauriens furent mis au jour, incluant *Rhabdodon*, titanosauriens, *Variraptor* et de nouvelles surprises qui feront l'objet d'un prochain volume des Cahiers de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire.

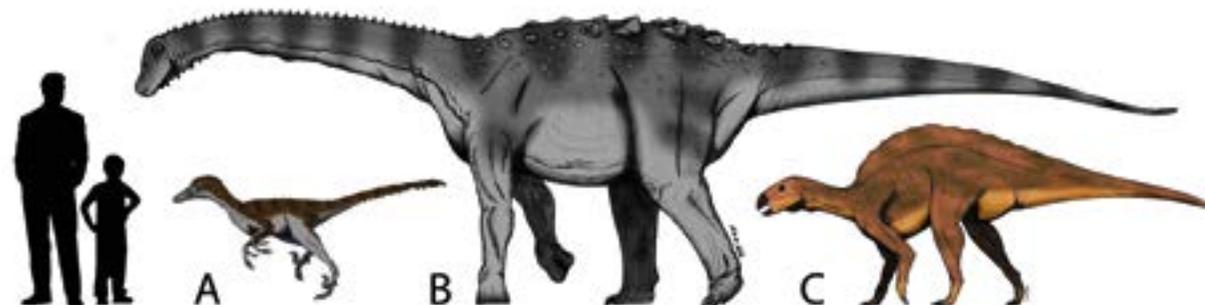


Figure 12 : Les dinosauriens de la Réserve Naturelle de Sainte-Victoire découverts : *Variraptor* (A), titanosaurien indéterminé (B) et *Rhabdodon* (C).

## BIBLIOGRAPHIE

- Agnolin F. L. et Novas, F. (2011). Unenlagiid theropods: are they members of the Dromaeosauridae (Theropoda, Maniraptora). *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 83 (1) : 117-162.
- Allain R. (1997). *Un nouveau gisement de vertébrés continentaux du Crétacé supérieur du Bassin de l'Arc (Bouches-du-Rhône). Description systématique et implications paléobiogéographiques*. Mémoire de DEA de l'Université de Montpellier II.
- Allain R. et Pereda-Suberbiola X. (2003). Dinosaurs of France. *Comptes Rendus Palevol* 2 : 27-44.
- Allain R. et Taquet P. (2000). A new genus of Dromaeosauridae (Dinosauria, Theropoda) from the Upper Cretaceous of France. *Journal of Vertebrate Paleontology* 20 (2) : 404-407.
- Buffetaut E., Costa G., Le Loeuff J., Martin M., Rage J.-C., Valentin X. et Tong H. (1996). An early Campanian vertebrate fauna from the Villeveyrac Basin (Hérault, Southern France). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen* 1 : 1-16.
- Buffetaut E., Cuny G. et Le Loeuff J. (1991). French dinosaurs : the best record in Europe ? *Modern Geology* 16 : 17-42.
- Buffetaut E. et Le Loeuff J. (1991). Une nouvelle espèce de *Rhabdodon* (Dinosauria, Ornithischia) du Crétacé supérieur de l'Hérault (Sud de la France). *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris* : 943-948.
- Buffetaut E., Le Loeuff J., Cavin L., Duffaud S., Gheerbrant E., Laurent Y., Martin M., Rage J.-C., Tong H. et Vasse D. (1997). Late Cretaceous nonmarine vertebrates from southern France: a review of recent finds. *Géobios* 20 : 101-108.
- Buffetaut E., Marandat B. et Sigé B. (1986). Découverte de dents de Deinonychosaures (Saurischia, Theropoda) dans le Crétacé supérieur du Sud de la France. *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris* 303 (15) : 1393-1396.
- Chanthasit P. (2010). *The ornithopod dinosaur Rhabdodon from the Late Cretaceous of France: anatomy, systematics and paleobiology*. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard Lyon 1.
- Chanthasit P. et Buffetaut E. (2009). New data on the Dromaeosauridae (Dinosauria: Theropoda) from the Late Cretaceous of southern France. *Bulletin de la Société Géologique de France* 180 (2) : 145-154.
- Coquand M. H. (1839). *Cours de géologie*. Imprimerie de Martin, Aix-en-Provence.
- Curry Rogers K. (2009). The Postcranial osteology of *Rapetosaurus krausei* (Sauropoda: Titanosauria) from the Late Cretaceous of Madagascar. *Journal of Vertebrate Paleontology* 29(4) : 1046-1086.
- Depéret C. (1900). Sur les dinosauriens des étages de Rognac et de Vitrolles du pied de la Montagne-Noire. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 130 : 637-639.
- Díez Díaz V., Garcia G., Knoll F., Pereda Suberbiola X. et Valentin X. (2012). New cranial remains of titanosaurian sauropod dinosaurs from the Late Cretaceous of Fox-Amphoux-Métisson (Var, SE France). *Proceedings of the Geologists' Association* 123(4) : 626-637.

- Díez Díaz V., Garcia G., Pereda Suberbiola X., Jentgen-Ceschino B., Stein K., Godefroit P. et Valentin X. (2018). The titanosaurian dinosaur *Atsinganosaurus velauciensis* (Sauropoda) from the Upper Cretaceous of southern France : New material, phylogenetic affinities, and palaeobiogeographical implications. *Cretaceous Research*. doi : 10.1016/j.cretres.2018.06.015
- Díez Díaz, V., Garcia, G., Pereda Suberbiola, X., Jentgen-Ceschino, B., Stein, K., Godefroit, P. et Valentin X. (2020) A new titanosaur (Dinosauria: Sauropoda) from the Upper Cretaceous of Velaux-La-Bastide Neuve (southern France). *Historical biology*. <https://doi.org/10.1080/08912963.2020.1841184>.
- Díez Díaz V., Mocho P., Páramo A., Escaso F., Marcos-Fernández F., Sanz J. L. et Ortega, F. (2016). A new titanosaur (Dinosauria, Sauropoda) from the Upper Cretaceous of Lo Hueco (Cuenca, Spain), *Cretaceous Research*, doi : 10.1016/j.cretres.2016.08.001.
- Díez Díaz, V., Pereda Suberbiola X. et Sanz J. L. (2013a). The axial skeleton of the titanosaur *Lirainosaurus astibiae* (Dinosauria: Sauropoda) from the latest Cretaceous of Spain. *Cretaceous Research*. doi.org/10.1016/j.cretres.2013.03.002.
- Díez Díaz, V., Pereda Suberbiola, X. et Sanz, J. L. (2013b). Appendicular skeleton and dermal armour of the Late Cretaceous titanosaur *Lirainosaurus astibia* (Dinosauria: Sauropoda) from Spain. *Palaeontologia Electronica* 16 (2).
- Doublier A. (1842). Ossements de saurien du terrain tertiaire du Var. *Bulletin de la Société Géologique de France* 1 : 449.
- Fabre A. (1869). *Les rues de Marseille*. Edition Camoin, Marseille, tome 5, 505p.
- Garcia G., Amico S., Fournier F., Thouand E. et Valentin X. (2010). A new Titanosaur genus (Dinosauria, Sauropoda) from the Late Cretaceous of southern France and its paleobiogeographic implications. *Bulletin de la Société Géologique de France* 181 : 269-277.
- Godefroit P., Codrea V. et Weishampel D. B. (2009). Osteology of *Zalmoxes shqiperorum* (Dinosauria, Ornithopoda), based on new specimens from the Upper Cretaceous of Nălaț-Vad (Romania). *Geodiversitas* 31 (3) : 525-553.
- Godefroit P., Garcia G., Gomez B., Stein K., Cincotta A., Lefèvre U. et Valentin X. (2017). Extreme tooth enlargement in a new Late Cretaceous rhabdodontid dinosaur from Southern France. *Scientific Reports* 7 : 13098.
- Gomez N. (1989). *Compte rendu de la fouille paléontologique ayant eu lieu du 16 au 20 octobre 1989 sur le site du Parc départemental de Roques Hautes, au pied de la Sainte-Victoire*. Rapport de la Réserve Géologique de Haute-Provence, non publié, 9p.
- Lapparent A.-F. de (1947). Les dinosauriens du Crétacé supérieur du Midi de la France. *Mémoire de la Société Géologique de France* : 1-67.
- Le Loeuff J. (1991). The Campano-Maastrichtian vertebrate faunas from southern Europe and their relationships with other faunas in the world ; palaeobiogeographical implications. *Cretaceous Research* 12 : 92-114.
- Le Loeuff J. (1993). European Titanosaurids. *Revue de Paléontologie* 7 (vol. spéc.) : 105-117.
- Le Loeuff J. (2005). Osteology of *Ampelosaurus atacis* (Titanosauria) from Southern France. In : *Thunder-Lizards - The Sauropodomorpha Dinosaurs*, Tidwell V. et Carpenter K. (Eds.). Indiana University Press Bloomington/Indianapolis : 115-137.
- Le Loeuff J. et Buffetaut E. (1991). *Tarascosaurus salluvicus* nov. gen., nov. sp., dinosaure théropode du Crétacé supérieur du Sud de la France. *Géobios* 24 : 585-594.
- Le Loeuff J. et Buffetaut E. (1998) A new dromaeosaurid theropod from the Upper Cretaceous of southern France. *Oryctos* 1 : 105-102.
- Le Loeuff J., Buffetaut E., Méchin P. et Méchin-Salessy A. (1989). Un arrière-crâne de dinosaure titanosauridé (Saurischia, Sauropoda) dans le Crétacé supérieur du Var (Provence, France). *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris* 309 : 851-857.
- Le Loeuff J., Buffetaut E., Méchin P. et Méchin-Salessy A. (1992). The first record of dromaeosaurid dinosaurs (Saurischia, Theropoda) in the Maastrichtian of southern Europe : palaeobiogeographical implication. *Bulletin de la Société Géologique de France* 163 (3) : 337-343.
- Leleu S. (2005). *Les cônes alluviaux Crétacé Supérieur-Paléocène en Provence – traceurs de l'évolution morpho-tectonique des stades précoces de collision*. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 222p.
- Loupe V. (2011). *Biologie de la ponte de deux espèces de dinosaures du Campanien de Roques-Hautes (Montagne Sainte-Victoire, Bouches-du-Rhône, France)*. Mémoire de Master de l'Université Montpellier II.
- Matheron P., (1846). Sur les terrains traversés par le souterrain de la Nerthe, près Marseille. *Bulletin de la Société Géologique de France* 4 (2) : 261-269.
- Matheron P. (1869a) Note sur les reptiles fossiles des dépôts fluvio-lacustres crétacés du bassin à lignite de Fuveau. *Bulletin de la Société géologique de France* 2 (26) : 781-795.
- Matheron P. (1869b). Notice sur les reptiles fossiles des dépôts fluvio-lacustres crétacés du bassin à lignite de Fuveau. *Mémoire de l'Académie Impériale des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Marseille* : 345-379.
- Matheron P. (1878-1880). *Recherches paléontologiques dans le midi de la France*. Ouvrage inachevé conservé au Muséum d'Histoire Naturelle de Marseille.
- Matheron P. (1891). Sur les animaux vertébrés dans les couches d'eau douce crétacée du Midi de la France. *Association Française pour l'Avancement des Sciences*, p.382-383.
- Méchin P. (2017). Chercheurs de reptiles fossiles dans le Var. Des sauriens et des hommes. *Bulletin de la Société d'Etudes Scientifiques et Archéologiques de Draguignan et du Var* 53 (nouvelle série) : 11-30.
- Norell M. A. et Makovicky P. J. (1999). Important features of the dromaeosaurid skeleton II : Information from newly collected specimens of *Velociraptor mongoliensis*. *American Museum Novitates* 3282, 45 p.
- Ósi A., Prondvai E., Butler R. et Weishampel D. B. (2012). Phylogeny, Histology and Inferred Body Size Evolution in a New Rhabdodontid Dinosaur from the Late Cretaceous of Hungary. *PLoS ONE* 7 (9) : 1-44.
- Ostrom J. H. (1969). Osteology of *Deinonychus antirrhopus*, an unusual theropod from the Lower Cretaceous of Montana. *Yale Peabody Museum Bulletin* 30, 165 p.
- Pincemaille-Quilleveré M. (2002). Description d'un squelette partiel de *Rhabdodon priscus* (Euornithopoda) du Crétacé supérieur de Vitrolles (Bouches du Rhône, France). *Oryctos* 4 : 39-70.
- Pincemaille-Quilleveré M., Buffetaut E. et Quilleveré F. (2006). Description ostéologique de l'arrière-crâne de *Rhabdodon* (Dinosauria, Euornithopoda) et implications phylogénétiques. *Bulletin de la Société Géologique de France* 177 (2) : 97-104.

- Torices A., Currie P. J., Canudo J. I. et Pereda Suberbiola X. (2015). Theropod dinosaurs from the Upper Cretaceous of the South Pyrenees Basin of Spain. *Acta Palaeontologica Polonica* 60 (3) : 611–626.
- Tortosa T. (2014). *Vertébrés continentaux du Crétacé supérieur de Provence (Sud-Est de la France)*. Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 581p.
- Turner A. H., Makovicky P. J. et Norell M. A. (2012) A review of Dromaeosaurid systematics and paravian phylogeny. *Bulletin of the American Museum of Natural History* 371 : 1-206.
- Répelin J. (1900). *Catalogue méthodique détaillé de la collection paléontologique de Philippe Matheron, correspondant de l'Institut (Académie des sciences)* . Ed. Saint-Léon, Marseille, 148p.
- Valentin X., Godefroit P., Tabuce R., Vianey-Liaud M., Wu W. et Garcia G. (2012). First Late Maastrichtian (Latest Cretaceous) vertebrate assemblage from Provence (Vitrolles-la-Plaine, Southern France). In : Godefroit P. (Ed.). *Bernissart Dinosaurs and Early Cretaceous*.
- Vila B., Galobart À., Canudo J. I., Le Loeuff J., Dinarès-Turell J., Riera V., Oms O., Tortosa T. et Gaete, R. (2012). The diversity of sauropod dinosaurs and their first taxonomic succession from the latest Cretaceous of southwestern Europe : Clues to demise and extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 350-352: 19-38.
- Villeneuve C. (1821). *Statistique du département des Bouches-du-Rhône, avec atlas, dédiée au Roi, publiée d'après le vœu du Conseil général du Département*, tome 1. Ed. Antoine Ricard imprimeur du roi et de la préfecture, Marseille, 944 p.
- Weishampel D. B., Jianu C.-M., Csiki Z. et Norman D. B. (2003). Osteology and phylogeny of *Zalmoxes* (n. g.), an unusual Euornithopod dinosaur from the latest Cretaceous of Romania. *Journal of Systematic Palaeontology* 1 : 65-123.
- Wilson J. A. et Upchurch P. (2003). A revision of *Titanosaurus* Lydekker (Dinosauria – Sauropoda), the first dinosaur genus with a 'Gondwanan' distribution. *Journal of Systematic Palaeontology* 1 : 125-160.



Fragment d'os de dinosaurien (probablement un fémur de Rhabdodon) découvert dans le niveau détritique du secteur BGC3.2 (photo N. Bertucelli, 2010).

Les définitions des termes sont de Tortosa T. et sont complétées par celles tirées de :

Bourideys J. et Floquet M. (2020) Glossaire, in : *La géologie des Bouches-du-Rhône, Roches et paysages remarquables*, Bourideys J. (Coord). BRGM Editions, Orléans : 437-446.

Foucault A. et J.-F. Raoult (2010) *Dictionnaire de géologie*, 7ème édition. Dunod, 388p.

## A

**Acétabulum** : (n. m.) Cavité du bassin (ou pelvis) servant d'articulation avec le fémur. Chez les dinosauriens, les bordures de l'acétabulum sont formées par les trois os pelviens : l'**ilion\***, le **pubis\*** et l'**ischion\***.

**Alvéole dentaire** : (n. m. ou f.) Cavité dans l'os de la mâchoire dans laquelle la dent est enchâssée.

**Amniote** : (n. m.) Groupe de vertébrés tétrapodes qui ont la particularité de disposer d'un sac amniotique, protégeant l'embryon ou le fœtus.

**Amphicœle** : (adj.) Qualifie une vertèbre présentant un **centrum\*** avec des surfaces articulaires (antérieure et postérieure) fortement concaves.

**Anomalie magnétique** : (n. f.) Voir **magnétisme terrestre\***.

**Argiles** : (n. f.) Terme désignant soit un minéral du groupe des phyllosilicates (à structure lamellaire), soit une roche sédimentaire composée pour l'essentiel de ces minéraux. On parle alors d'argilite.

**Autapomorphie** : (n. f.) En classification, il s'agit d'un caractère (anatomique, physiologique ou moléculaire) évolutivement nouveau, dit « dérivé », propre à un taxon. Ces caractères permettent généralement de définir une espèce (ou un genre monospécifique).

**Authigène** : (adj. ; syn : authigénétique) S'applique à tout minéral ayant pris naissance dans la roche, ou formation géologique, où il se trouve. Ce terme est utilisé surtout pour les minéraux ayant cristallisé au sein d'une roche sédimentaire au cours de la diagenèse. Le terme contraire est allogène.

**Autochtone** : (adj.) S'applique à une roche sédimentaire ou à l'origine de celle-ci lorsque ses composants ont été déposés ou élaborés sur place et n'ont pas été arrachés à une autre roche. Ce terme s'applique aussi aux terrains qui n'ont pas été sensiblement déplacés par les mouvements tectoniques depuis leur formation. Le terme contraire est allochtone.

## B

**Basal** : (adj.) Qualifie un taxon A par rapport à des taxons B et C si sa position au sein d'un arbre phylogénétique en fait un taxon-frère d'un clade « (B, C) » (groupant B et C). Le taxon A est inférieur au clade « (B, C) » .

**Basioccipital** : (adj.) Qualifie l'os basioccipital, littéralement « la base de l'os occipital ». Il s'agit d'un os impair, constituant la partie inférieure et postérieure de la boîte crânienne. Il participe au condyle occipital et à la bordure ventrale du trou occipital (**foramen magnum\***). Cet os est fusionné latéralement aux os exoccipitaux\* et ventralement à l'os **basiphénoïde\***.

**Bioturbation** : (n. f.) Ensemble des petits dérangements dans un sédiment dus à des déplacements d'organismes vivants : terriers, galeries, traces de fouissement ou de reptation (pistes), etc.

## C

**Calcaire** : (n. m.) Roche sédimentaire carbonatée contenant au moins 50% de calcite CaCO<sub>3</sub>, pouvant être accompagnée d'un peu de dolomite, d'aragonite, de sidérite. Les calcaires sont de faible dureté (rayés au couteau) et font effervescence (dégagement bouillonnant de CO<sub>2</sub>) à froid sous l'action d'un acide dilué. Ils contiennent souvent des fossiles d'où leur importance en stratigraphie. Dans la plupart des cas, ils tirent leur origine de l'accumulation de squelettes ou de coquilles calcaires. Une petite part résulte de précipitations chimiques ou biochimiques. Selon les milieux de dépôt, on distingue les calcaires marins (pélagiques à néritiques) et les calcaires continentaux (lacustres, fluviatiles).

**Calcrète** : (n. f.) Accumulation calcaire qui se forme par évaporation des eaux d'infiltration vers la surface des sols de régions arides ou semi-arides.

**Centrum** : (n. m. ; pl. : centra ; syn. : corps vertébral) Partie cylindrique de la **vertèbre\***, constituant sa partie ventrale. Les surfaces articulaires , antérieure et postérieure, peuvent avoir plusieurs aspects (**amphicœle\***, **platicœle\***, **opisthocœle\***, **procœle\***...).

**Charophyte** : (n. f.) Groupe de végétaux intermédiaires entre les algues et les mousses, vivant dans les eaux douces ou saumâtres, et composés d'un axe portant des rameaux à la naissance desquels fructifient des oogones. Ces derniers, le plus souvent isolés, sont connus à l'état fossile sous le nom de gyrogonites.

**Chevron** : (n. m. ; syn. : arc hémal) Os en forme de « V » ou « Y » s'articulant à l'intersection de deux **centra\*** de **vertèbres caudales\***. Les chevrons forment une structure en série sur la partie ventrale de la queue. L'ouverture entre les deux pédoncules permet le passage du canal hémal qui protège les nerfs et vaisseaux sanguins.

**Cléidoïque** : (adj.) Qualifie les œufs d'animaux ovipares terrestres dont la coquille forme d'un système presque clos et autosuffisant pour le développement de l'embryon, excepté pour les gaz qui sont échangés avec l'extérieur.

**Coupe équilibrée** : (n. f.) Coupe géologique représentant les structures dans leur position originelle. Ainsi, le développement d'une couche figurée dans ce type de coupe donne la mesure de son extension primitive, avant qu'elle soit plissée ou érodée. Cette méthode consiste à déplier rigoureusement des coupes ou des cartes avec des règles géométriques, puis de se servir de la restauration pour vérifier une interprétation.

**Coupe-type** : (n. f.) Coupe géologique levée sur le terrain consistant à indiquer sous le trait du profil topographique les amorces des couches telles qu'on les voit, avec leurs pendages, à repérer les échantillons récoltés et à noter les diverses observations concernant ces terrains. Une coupe est qualifiée de « type » lorsqu'elle sert de référence pour une série stratigraphique. Lorsque la coupe concerne un affleurement désigné comme type d'un étage géologique, on parle de **stratotype\***.

**Crête cnémiale** : (n. f.) Voir **tibia\***.

**Crête prootique** : (n. f. ; lat. : crista prootica) Voir **prootique\***.

## D

**Deinonychosaurien** : (n. m. ; lat. : Deinonychosauria) Clade éteint de dinosauriens **théropodes\*** carnivores connus du Jurassique supérieur au Crétacé terminal. Le nom de ce clade est basé sur le genre *Deinonychus* qui fut jusque dans les années 1990 le plus gros représentant de ce groupe. Ces prédateurs se reconnaissent à l'importante griffe en forme de faucille qu'ils portent sur le second orteil (d'où leur nom de « Griffe terrible »). Ce clade se subdivise en deux familles : les **droméosauridés\*** et les troodontidés.

**Dépôt progradant** : (n. m.) Dépôt sédimentaire avançant progressivement depuis son point d'origine d'accumulation vers une direction extérieure.

**Dent dentaire** : (n. f.) Dent localisée sur l'os dentaire (os constituant la mâchoire inférieure).

**Dent maxillaire** : (n. f.) Dent localisée sur l'os maxillaire (os constituant la mâchoire supérieure).

**Dentaire** : (adj.) Qualifie l'os dentaire qui constitue la partie la plus importante de la mâchoire inférieure des reptiles. Il peut être en contact antérieurement avec l'os prédentaire, s'il est présent. Il est bordé ventralement par l'os splénial et ventropostérieurement par l'os articulaire (ces deux os peuvent partiellement couvrir la surface médiale de l'os dentaire). Il est en contact postérieurement avec l'**os surangulaire\*** et postéroventralement avec l'os angulaire. L'os dentaire présente un processus coronoïde (un développement postéro-dorsal) venant se plaquer à l'os coronoïde ou au **processus coronoïde\*** de l'os surangulaire.

**Diaphyse** : (n. f. ; syn. : corps osseux) Il s'agit de la partie médiane d'un os long. Elle est de forme tubulaire et constitue l'axe longitudinal de l'os. La diaphyse renferme un canal médullaire central. Chaque extrémité de la diaphyse se poursuit avec la métaphyse et l'épiphyse (extrémité proximale ou distale), qui sert d'articulation.

**Droméosauridé** : (n. m. ; lat. : Dromaeosauridae) Famille éteinte de dinosauriens **théropodes\*** carnivores appartenant au clade des **deinonychosauriens\***. Ils sont uniquement connus dans le Crétacé. Le nom de cette famille est basé sur le genre *Dromaeosaurus* (« Lézard coureur »). Ils partagent avec les oiseaux de nombreux caractères anatomiques propres, tels que les plumes. Ces prédateurs véloces sont informellement surnommés « raptor » depuis que l'un des genres de ce groupe, *Velociraptor*, devint célèbre dans les années 1990 avec la sortie du film *Jurassic Park*.

## E

**Echelle géomagnétique** : (n. f.) Voir **échelle paléomagnétique\***.

**Echelle magnétostratigraphique** : (n. f.) Echelle temporelle proposant une division du temps s'appuyant sur la datation et l'utilisation du champ magnétique fossilisé des roches sédimentaires (voir **magnétisme terrestre\*** et **paléomagnétisme\***).

**Echelle paléomagnétique** : (n. f.) Echelle temporelle constituée par la succession des périodes de polarités normales et inverses du champ **magnétique terrestre\*** (voir **paléomagnétisme\***). La durée de chaque épisode est étalonnée à partir des datations absolues des roches.

**Exoccipital** (adj.) : Qualifie l'os exoccipital, un os pair fusionné médialement (direction interne) avec l'os supraoccipital\* et l'os basioccipital pour former la région occipitale, à l'arrière de la boîte crânienne. Il est également fusionné à l'os opisthotique pour former une projection latérale (processus paroccipital ou processus exoccipital-opisthotique). Ventralement, il est fusionné à l'os basioccipital.

**Evaporite** : (n. f.) Terme général désignant des dépôts riches en chlorures et sulfates alcalins. La précipitation de ces sels succède à des concentrations par évaporation intense, généralement dans des lagunes peu ou pas reliées à la mer, ou encore dans des lacs salés.

## F

**Faciès** : (n. m.) Ensemble des caractéristiques d'une roche permettant de la distinguer, qu'elle soit de nature magmatique, métamorphique ou sédimentaire. Dans ce dernier cas on associe les caractères lithologiques (**lithofaciès\***) et paléontologiques (biofaciès). Dans le cas des roches magmatiques et métamorphiques les faciès sont souvent déterminés par un assemblage spécifique de minéraux (exemple : faciès schiste bleu à glaucophane).

**Fibula** : (n. f. ; pl. fibulas ou fibulae ; syn. : péroné). Os long de la jambe. Il est articulé avec le tibia à ses deux extrémités, et également avec l'astragale à son extrémité distale sur la malléole externe. Cet ensemble forme la partie inférieure de la jambe entre le genou et la cheville.

**Fenêtre ovale** : (n. f. ; lat. : *fenestra ovalis*) Ouverture dans l'oreille interne où est localisé l'étrier (*stapes* ; syn. : columelle).

**Foramen** : (n. m. ; pl. : foramina) Désigne un orifice ou une ouverture dans un os ou un organe pour le passage de vaisseaux sanguins, de nerfs ou de muscles.

**Foramen obturé** : (n. m.) Orifice présent sur sa partie proximo-dorsale du pubis. Il peut être complètement enfermé par l'os pubien ou partiellement ouvert. Dans ce second cas, c'est la partie proximale de l'ischion qui participe à sa fermeture.

**Foramen magnum** : (n. m. ; syn. : trou occipital) Orifice permettant le passage du bulbe rachidien, lui-même constitué par le renflement supérieur de la moelle épinière.

**Foramen métotique** : (n. m. ; syn. : foramen jugulaire) **Foramen\*** situé dans la fissure métotique au niveau de l'oreille interne des reptiles. Il s'agit d'une ouverture donnant à la fois sur la rampe tympanique (*scala tympani*) à travers la fenêtre pseudo-ronde de la cochlée (*fenestra pseudorotunda*) et sur la sortie du **nerf crânien\*** vague (nerf X).

**Fosse adductrice** : (n. f. ; syn. : orifice de Meckel) Voir **surangulaire\***.

**Fosse interzygapophysaire** : (n. f.) Dépression située entre deux zygapophysies (voir **zygapophyse\***).

## G

**Glénoïde** (adj. ; n. m.) : Qualifie une cavité articulaire présente sur certains os. Généralement peu profonde, elle reçoit la tête articulaire d'un autre os (que l'on nomme condyle). Lorsqu'elle est profonde, elle forme alors une demi-sphère (un bol) recevant le nom de cotyle ou cavité cotyloïde.

**Graveleux, euse** : (adj.) Qui contient des gravelles, des éléments de la taille d'un grain de sable ou d'un gravier (classe des arénites ou des rudites). Un calcaire est dit graveleux s'il contient 10% au moins de gravelles.

**Grès** : (n. m.) Roche sédimentaire détritique terrigène composée à 85% au moins de grains (très souvent de quartz) plus ou moins arrondis, de 62,5 µm à 2 mm (classe des arénites). Ces roches communes constituent l'essentiel de nombreuses séries sédimentaires. Elles sont organisées en bancs, réguliers ou non, ou encore en lentilles.

**Gymnosperme** : (n. f.) Groupe comprenant les plantes ayant des fleurs et une graine non enfermée dans une enveloppe (exemple des conifères), à la différence des angiospermes.

## H

**Hadrosauridé** : (n. m. ; lat. : Hadrosauridae) Famille éteinte de dinosauriens **ornithopodes\*** appartenant au clade des **iguanodontiens\***. Ces animaux herbivores de grande taille sont surnommés « dinosaures à bec de canard » et furent très communs durant le Crétacé tardif. Le nom de cette famille est basé sur le genre *Hadrosaurus* (« lézard robuste ») qui fut le premier dinosaure reconstitué en 1858.é final.

**Holotype** : (n. m.) Il s'agit du matériel **type\*** original et unique, explicitement désigné par l'auteur de la description, pour porter le nom du taxon de rang spécifique décrit dans une publication scientifique. Dans le cas d'organismes constitués de plusieurs éléments, le type peut correspondre à l'ensemble du matériel appartenant à un seul et même individu (de préférence si les éléments sont en articulation ou connexion anatomique).

## I

**Iguanodontien** : (n. m. ; lat. : Iguanodontia) Clade éteint de dinosauriens ornithopodes\* connus depuis la fin du Jurassique jusqu'au début du Crétacé. Le nom de ce clade est basé sur le genre *Iguanodon* (« dent d'iguane »). Ces animaux pouvaient atteindre une dizaine de mètres de longueur et se déplacer sur deux ou quatre pattes selon leur vitesse et leur taille. Ce groupe a disparu progressivement durant la seconde moitié du Crétacé pour ne finir représentés que par les **hadrosauridés\*** au Crétacé final.

**Ilion** : (n. m. ; lat. *ilium/ilia*) Un des trois os constituant le bassin (pelvis). Il est situé dorsalement au **pubis\*** (contact via le pédoncule pubien) et à l'**ischion\*** (contact via le pédoncule ischiatique). L'ilion est médialement en contact avec le **sacrum\***. Les ilions, les ischions, les pubis et le sacrum forment la ceinture **pelvienne\***. L'ilion en lui-même est plat et large et participe ventralement à la bordure dorsale de l'**acétabulum\***. Cette bordure est marquée par une tubérosité nommée antitrochanter. L'ilion possède un important processus antérieur (le processus pré-acétabulaire) et un important processus postérieur (le processus post-acétabulaire). Ce dernier présente ventralement une importante dépression nommée fosse brevis, dont la bordure médiale (interne) est formée par le plateau brevis. Cette fosse sert d'attache aux puissants muscles de la queue.

**Illite** : (n. f.) Minéral argileux de structure proche du mica blanc dont il dérive souvent par altération.

**Ischion** : (n. m ; lat. : *ischium/ischia*) Un des trois os constituant le bassin (pelvis). Il est situé ventralement à l'**ilion\*** et postérieurement au **pubis\***. Chez les dinosauriens, il s'agit d'un os en forme de bâton ou de lame (lame ischiatique) avec une partie proximale plus élargie s'articulant avec les deux autres os. La partie proximale de l'os participe à la bordure ventro-postérieure de l'**acétabulum\***. Les extrémités distales des deux lames ischiatiques forment une symphyse (articulation cartilagineuse peu mobile). L'ischion porte sur sa bordure ventrale le **processus obturateur** qui entre en contact avec le pubis. Les ilions, les ischions, les pubis et le **sacrum\*** forment la **ceinture pelvienne\***.

## K

**Karstification** : (n. m.) Processus géochimique affectant un plateau calcaire et formant un ensemble de fissures et de cavités souterraines plus ou moins développées et connectées suite à la dissolution des calcaires. L'eau chargée de dioxyde de carbone pénètre dans les fissures de la roche, la dissout progressivement et fait ainsi naître tout un réseau souterrain et des reliefs particuliers en surface (dolines, poljés, lapiez...).

## L

**Lacustre** : (adj.) Qui est relatif aux lacs, vastes étendues d'eau douce entourées de terre. Dans les régions semi-arides et arides, ils sont souvent temporaires, et peuvent être salés.

**Lame centrodiapophysaire** : (n. f.) lame osseuse accessoire située de part et d'autre d'une vertèbre. Elle relie le **centrum\*** à la **diapophyse\***.

**Lame centroparapophysaire** : (n. f.) lame osseuse accessoire située de part et d'autre d'une vertèbre. Elle relie le **centrum\*** à la **parapophyse\***.

**Lame ischiatique** : (n. f.) Partie distale de l'ischion formant une longue lame osseuse (voir **ischion\***).

**Lame postspinale** : (n. f.) Voir **lame spinale\***.

**Lame préspinale** : (n. f.) Voir **lame spinale\***.

**Lame scapulaire** : (n. f.) Voir **scapula\***.

**Lame spinale** : (n. f.) lame osseuse située sur l'axe sagittal d'une vertèbre, courant dorso-ventralement le long de l'épine neurale. Cette lame peut être bifide ventralement. Elle peut être située sur la surface antérieure de l'épine neurale (lame préspinale) et/ou sur la surface postérieure de l'épine neurale (lame postspinale).

**Lame spinopostzygapophysaire** : (n. f.) lame osseuse située sur une vertèbre et reliant l'épine neurale aux deux postzygapophysies (voir **zygapophyse\***).

**Lame spinoprézygapophysaire** : (n. f.) lame osseuse située sur une vertèbre et reliant l'épine neurale aux deux prézygapophysies (voir **zygapophyse\***).

**Latéosphénoïde** : (adj.) Qualifie l'os latéosphénoïde, un petit os aplati formant la partie antéro-latérale de la boîte crânienne. Il est situé antérieurement à l'os prootique et entre en contact avec l'os **pariétal\***, l'os frontal (sommets de la boîte crânienne) et l'os postorbitaire (bordure postérieure de l'œil). L'ossification de cet os est propre aux reptiles archosauriformes (crocodiliens, ptérosauriens, dinosauriens, oiseaux).

**Lectotype** : (n. m.) Il s'agit d'un spécimen qui devient le **type\*** de référence en absence d'**holotype\*** désigné lors de la publication originale, ou s'il a été perdu ou détruit. Cette typification se fait a posteriori parmi les éléments du matériel original de la série type (s'il en subsiste) ou d'après une illustration sur laquelle la description originale est basée.

**Lithofaciès** : (n. m. ; syn. : faciès pétrographique) Voir **faciès\***.

**Lithologie** : (n. f.) Nature des roches d'une formation géologique.

**Lithophage** : (adj.) Qualifie certains organismes qui creusent les roches pour s'y loger.

**Log** : (n. m.) Anglicisme utilisé pour désigner une succession des couches de terrain, mise sous forme de colonne stratigraphique. Un log correspond à l'étude géologique d'un site, d'une région ou d'un forage.

## M

**Magnétisme terrestre** : (n. m.) Ensemble du champ magnétique lié à la Terre. En première approximation ce champ est le même que celui que développerait un barreau aimanté situé au centre du Globe terrestre et que l'on appelle champ dipolaire ou champ de Gauss, ou encore champ géomagnétique. En moyenne, sur une longue période de temps, on peut considérer que ce barreau est allongé comme l'axe de rotation de la Terre, bien qu'il s'en écarte parfois considérablement (jusqu'à 30° ; actuellement de 11,5°). Ce mouvement est appelé variation séculaire. A une distance suffisante de la Terre, le champ géomagnétique suffit à rendre compte du magnétisme terrestre (compte non tenu du vent solaire qui le perturbe), mais lorsqu'on s'en approche, le champ réel en diffère parfois considérablement : on le représente alors au mieux par des modèles mathématiques qui tiennent compte d'un champ profond non dipolaire également affecté par une variation séculaire. Par rapport à ces modèles, il existe encore, dans l'espace, des différences avec le champ mesuré : elles sont appelées **anomalies magnétiques\*** et sont d'un grand intérêt pour l'étude de la structure et de l'histoire de la croûte terrestre (voir **paléomagnétisme\***). Le champ magnétique en un point peut être caractérisé par son intensité, son inclinaison (angle par rapport à l'horizontale, et sa déclinaison (azimut), ces deux dernières pouvant être matérialisées par l'orientation d'une aiguille aimantée suspendue par son centre de gravité. On peut représenter ces grandeurs cartographiquement par des courbes d'égales valeurs que l'on nomme respectivement isogammes, isoclines et isogones.

**Métamorphique** : (adj.) Correspondant au métamorphisme, une transformation d'une roche à l'état solide du fait d'une élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux, dits néoformés, et acquisition de textures et structures particulières, sous l'influence de conditions physiques et/ou chimiques différentes de celles ayant présidé à la formation de la roche originelle.

**Microcodium** : (n. m.) Assemblage en épi de petits prismes calcaires, connu notamment dans les sédiments du Crétacé supérieur et de l'Eocène, et dont l'origine serait organique (calcification de filaments de champignons dans les **paléosols**).

**Molasse** : (n. f.) Formation sédimentaire détritique, épaisse, composée pour partie de couches turbiditiques (voir **turbidite\***) mais aussi de couches **terrigènes\*** non turbiditiques (grès, conglomérats), déposées dans une zone orogénique (voir **orogène\***) en fin de tectonisation, et typiquement en discordance avec les couches sous-jacentes. Les molasses sont le plus souvent tectoniquement **autochtones\***.

**Mudstone** : (n. m.) Roche carbonatée sédimentaire comportant plus de 10% de ciment finement cristallin et une proportion variable d'éléments figurés non jointifs.

## N

**Nerfs crâniens** : (n. m.) Il s'agit des nerfs qui émergent directement du tronc cérébral (par opposition aux nerfs spinaux qui émergent de la moelle épinière). Les sauropsidés (incluant les oiseaux) et les mammifères possèdent douze nerfs numérotés de I à XII. Ils sont :

- Nerf I : nerf olfactif ;
- Nerf II : nerf optique ;
- Nerf III : nerf oculomoteur (ou moteur oculaire commun) ;
- Nerf IV : nerf trochléaire (ou pathétique) ;
- Nerf V : nerf trijumeau, composé de trois branches : nerf V<sub>1</sub> : nerf ophtalmique, nerf V<sub>2</sub> : nerf maxillaire (mâchoire supérieure et nerf V<sub>3</sub> : nerf mandibulaire (mâchoire inférieure) ;

- Nerf VI : nerf abducens (ou moteur oculaire externe) ;
- Nerf VII : nerf facial, composé de deux racines : racine motrice et racine sensitive (nerf VII bis ou nerf de Wrisberg) ;
- Nerf VIII : nerf vestibulocochléaire (ou auditif) ;
- Nerf IX : nerf glossopharyngien ;
- Nerf X : nerf vague ;
- Nerf XI : nerf accessoire (ou spinal) ;
- Nerf XII : nerf hypoglosse (ou grand hypoglosse).

**Nom douteux** : (n. m. ; lat. : *nomen dubium/nomina dubia*) Dans la nomenclature zoologique, un nom douteux est un nom scientifique qui est d'utilisation inconnue (non publiée) ou douteuse (absence d'holotype, problèmes de diagnose, de synonymie,...).

## O

**Oo-espèce** : (n. f.) Voir **Veterovata\***.

**Oo-famille** : (n. f.) Voir **Veterovata\***.

**Oo-genre** : (n. m.) Voir **Veterovata\***.

**Oo-taxon** : (n. m.) Voir **Veterovata\***.

**Opisthocœle** : (adj) Qualifie une vertèbre présentant un **centrum\*** avec une surface articulaire postérieure concave (la surface antérieure étant convexe).

**Ornithischien** : (n. m. ; lat. : Ornithischia ; syn. : avipelvien) Ordre éteint de dinosauriens caractérisés par un « bassin d'oiseau », c'est-à-dire que leur **pubis\*** pointe vers l'arrière parallèlement à l'**ischion\***. Il est à noter que les oiseaux actuels sont en fait des **saurischiens\*** (à « bassin de reptiles), l'autre ordre de dinosauriens.

**Ornithopode** : (n. m. ; lat. : Ornithopoda) Sous-ordre de dinosauriens **ornithischiens\*** dont la taille variait du petit gabarit de quelques mètres, bipèdes et coureurs, à des espèces dépassant la dizaine de mètres de longueur et quadrupèdes. Les ornithopodes sont l'un des groupes d'herbivores les plus diversifiés durant le Crétacé. Ce sont les seuls dinosauriens à avoir développé la mastication de manière aussi efficace que chez les ruminants actuels. Les ornithopodes les plus connus sont les **iguanodontiens\*** et, parmi eux, les **hadrosauridés\***.

**Orogenèse** : (n. f.) Tout processus géologique conduisant à la formation de montagnes.

## P

**Paléosol** : (n. m.) Sol qui s'est constitué lors de périodes géologiques passées dans des conditions différentes de celles de notre époque. Il peut avoir été recouvert par des sédiments, ou bien être encore visible en surface.

**Paléomagnétisme** : (n. m.) Ensemble des effets du champ **magnétique terrestre\*** dans le passé. Un certain nombre de considérations permettent de reconstituer ce champ : les corps ferromagnétiques, chauffés à une certaine température appelée point de Curie (environ 600°C pour les roches) perdent leur aimantation. S'ils se refroidissent alors, ils s'aimantent de nouveau en fonction du champ magnétique dans lequel ils sont placés, et conservent ensuite cette orientation magnétique par un phénomène de rémanence thermomagnétique (ou thermorémanence). C'est ainsi que les basaltes des dorsales océaniques et roches volcaniques terrestres se solidifiant fossilisent le champ magnétique terrestre de l'époque. Si l'on connaît l'âge de ces roches, on peut établir l'histoire des variations de ce champ. Un phénomène comparable se produit pour les roches sédimentaires dont les composants magnétiques (cristaux d'oxydes de fer comme la magnétite) s'orientent dans le champ terrestre soit au moment de leur dépôt (aimantation rémanente détritique) soit au moment de leur cristallisation (aimantation rémanente chimique). Les mesures basées sur ces principes ont montré que le champ magnétique terrestre avait subi dans le passé de fréquentes inversions, le Nord magnétique se trouvant alors du côté du Sud géographique, et réciproquement. On a ainsi prouvé qu'il existait de longues périodes (époques) où le champ était soit normal soit inverse, coupées d'événements consistants en un court changement de polarité.

**Paléosurface d'abrasion** : (n. f.) Surface formée dans le passé, consécutive de l'érosion causée par le frottement des matériaux transportés par les eaux ou les glaces. Elle peut avoir été recouverte par des sédiments ou bien être visible en surface à notre époque.

**Palustre** : (adj.) Qui se rapporte aux marais.

**Palygorskite** : (n. f.) Silicate hydraté fibreux, rangé dans les minéraux argileux (voir **argiles\***).

**Parcimonie** : (n. f.) De manière générale, en Science, la parcimonie est la préférence pour l'explication la plus simple pour une observation. Ceci est généralement considéré comme le meilleur moyen de juger les hypothèses. En biologie, la parcimonie est un principe avec pour postulat le fait que les liens de parentés les plus vraisemblables entre des êtres vivants sont ceux qui résultent du plus petit nombre de changements évolutifs.

**Paralectotype** : (n. m.) Après la désignation d'un **lectotype\***, le paralectotype est tout spécimen supplémentaire de l'ensemble du matériel désigné par l'auteur pour représenter le taxon décrit (voir **type\***). Le paralectotype n'a aucune valeur de porteur.

**Pariétal** : (adj.) Qualifie l'os pariétal, un os pair plat participant à la formation du toit de la boîte crânienne. Il est situé postérieurement à l'os frontal.

**Pédogenèse** : (n. f.) Processus amenant à la formation des sols à partir d'une roche mère.

**Pédoncule ischiatique** : (n. m.) Voir **ilion\***.

**Pédoncule pubien** : (n. m.) Voir **ilion\***.

**Pelvien** : (adj.) Relatif au bassin (ou pelvis) Le bassin est constitué de l'**ilion\***, de l'**ischion\***, du **pubis\*** et du **sacrum\***.

**Phalange unguéale** : (n. f. ; syn. : griffe) Phalange terminale d'un doigt. Elle peut prendre la forme d'une griffe osseuse.

**Phylum** : (n. m. ; pl. : phyla) Groupement des classifications des êtres vivants ou fossiles (voir **taxon**).

**Plante en C<sub>3</sub>** : (n. f. ) Ce sont des plantes qui assimilent le carbone du CO<sub>2</sub> sous forme de phosphoglycerate (un composé à 3 atomes de carbone). Elles se développent plutôt dans les environnements riches en eaux souterraines où le rayonnement solaire et la température sont modérés et la concentration de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 200 ppm ou plus. Les plantes en C<sub>3</sub> sont apparues durant le Mésozoïque et représentent environ 95 % de la biomasse végétale actuelle.

**Plaque sternale** : (n. f.) Os plat pair occupant l'emplacement et la fonction équivalentes du sternum. Les plaques sternales s'articulent entre elle médialement (sur le plan sagittal de l'animal) et plus ou moins latéralement avec les os coracoïdes.

**Platicœle** : (adj. ; syn. : acœle) Qualifie une vertèbre présentant un **centrum\*** avec des surfaces articulaires (antérieure et postérieure) légèrement concaves.

**Pleurocèle** : (n. m.) Cavité sur les surfaces latérales d'une vertèbre (centrum et/ou arc neural).

**Poïkilotherme** : (adj.) Qualifie un organisme dont la température interne est dépendante de celle de l'environnement et qui ne contrôle pas sa température corporelle.

**Postzygapophyse** : (n. f.) Voir **zygapophyse\***.

**Préacétabulaire** : (adj.) Qualifie le processus antérieur de l'**ilion\***.

**Préarticulaire** : (adj.) Qualifie l'os préarticulaire qui constitue la portion postérieure de la mâchoire inférieure. Il est en contact avec l'os dentaire antérieurement, l'os surangulaire dorsalement, l'os articulaire médialement (direction interne) et l'os angulaire ventralement.

**Pré-pubis** : (n. m.) Voir **pubis\***.

**Prézygapophyse** : (n. f.) Voir **zygapophyse\***.

**Processus** : (n. m. inv. ; syn. : apophyse) En anatomie, il s'agit d'une excroissance osseuse participant à une articulation ou à l'insertion d'un muscle.

**Processus d'acromion** : (n. m.) Voir **scapula\***.

**Processus coronoïde** : (n. m.) Voir **surangulaire\***.

**Processus obturateur** : (n. m.) Voir **ischion\***.

**Processus olécrane** : (n. m.) Voir **ulna\***.

**Processus post-acétabulaire** : (n. m.) Voir **ilion\***.

**Processus post-pubien** : (n. m.) Voir **pubis\***.

**Processus pré-acétabulaire** : (n. m.) Voir **ilion\***.

**Processus pré-pubien** : (n. m.) Voir **pubis\***.

**Processus rétroarticulaire** : (n. m.) Voir **surangulaire\***.

**Processus sternal** : (n. m.) Excroissance osseuse de l'os coracoïde qui entre en contact, plus ou moins important, avec la **plaque sternale\***.

**Procœle** : (adj.) Qualifie une vertèbre présentant un **centrum\*** avec une surface articulaire antérieure concave (la surface postérieure étant convexe).

**Prootique** : (adj.) Qualifie l'os prootique, un os pair formant les bordures latérales de la boîte crânienne. L'os prootique et l'os opisthotique (situé postérieurement) forme la capsule otique (ou labyrinthe osseux). L'os prootique porte des ouvertures liées aux sorties des **nerfs crâniens\*** trijumeaux (nerf V) et facial (nerf VII). Une crête bien marquée, nommée **crête prootique\***.

**Pseudogley** : (n. m.) Sol ou partie d'un sol bien drainé (horizon) temporairement engorgé par une nappe d'eau superficielle.

**Pubis** : (n. m. inv.) Un des trois os constituant le bassin (pelvis), se positionnant ventralement à l'**ilion\*** et antérieurement à l'**ischion\***. Chez les dinosaures **saurischiens\*** le pubis se projette vers l'avant (condition propubienne). Chez les dinosaures **ornithischiens\***, le pubis se projette vers l'arrière (condition opisthopubienne). Dans cette condition, le pubis présente un important **pré-pubis** (ou **processus prépubien**), bien plus développé que le post-pubis (ou **processus post-pubien**). La partie proximale de l'os participe à la bordure antéro-ventrale de l'**acétabulum\***. Cette partie de l'os expose également une ouverture, fermée ou non, nommée **foramen obturateur**. Chez certains **théropodes\***, le foramen reste très ouvert et porte ainsi le nom d'encoche obturée. Les ilions, les ischions, les pubis et le **sacrum\*** forment la ceinture **pelvienne\***.

## Q

**Quatrième trochanter** : (n. m.) Point d'attache musculaire positionné sur la surface médiale (interne) du fémur.

## R

**Rhabdodontidé** : (n. m. ; lat. : Rhabdodontidae) Famille éteinte de dinosauriens **ornithopodes\*** **iguanodontiens\*** herbivores endémique de l'Europe (Autriche, Espagne, France, Hongrie, Roumanie) durant le Crétacé. Le nom de cette famille est basé sur le genre *Rhabdodon* (« dent cannelée »).

## S

**Sacrum** : (n. m.) Os impair médian formé de la soudure des **vertèbres sacrées\***. Le **sacrum** est situé entre les deux ilions. Les **ilions\***, les **ischions\***, les **pubis\*** et le **sacrum\*** forment la ceinture **pelvienne\***.

**Saurischien** : (n. m. ; lat. : Saurischia ; syn. : sauripelvien) Ordre de dinosauriens caractérisés par un « bassin de lézard », c'est-à-dire que leur **pubis\*** pointe vers l'avant, contrairement au pubis qui pointe vers l'arrière. Cependant cette condition a évolué à de multiples reprises chez les saurischiens (chez les oiseaux par exemple) pour avoir une configuration homologue à celle des **ornithischiens\***, l'autre ordre de dinosauriens. Les oiseaux sont les seuls saurischiens ayant survécu à l'extinction de la crise Crétacé-Paléogène, il y a 66 millions d'années.

**Sauropode** : (n. m. ; lat. : Sauropoda) : Infra-ordre de dinosauriens **saurischiens\*** herbivores et quadrupèdes. Le nom de ce groupe signifie « pied de lézard ». Ils vécurent entre le Jurassique moyen et le Crétacé supérieur. On compte parmi les sauropodes les animaux aux plus longs cous et/ou queues et de plus longue taille de manière générale. Ce groupe inclut les plus gros animaux terrestres de tous les temps.

**Scapula** : (n. f. ; lat. : scapula/scapulae ; syn. : omoplate) Os de l'épaule formant une large lame osseuse. C'est l'os le plus important de la ceinture scapulaire. Il est composé d'une partie proximale en forme de cuillère s'articulant avec l'os coracoïde et d'une partie distale formant une **lame scapulaire** plus ou moins longue et large. La partie proximale est séparée de la lame scapulaire par un bombement osseux se prolongeant en une excroissance dorsale nommée **processus d'acromion**. La scapula peut être fusionnée avec l'os coracoïde et forme ainsi le scapulocoracoïde. Les scapulas, les coracoïdes et les **plaques sternales\*** forment la ceinture scapulaire.

**Smectite** : (n. f.) Minéral argileux (voir **argile\***) à teneur variable en sodium, aluminium, fer ou magnésium, qui présente la particularité de gonfler en fonction de la teneur en eau.

**Strato-croissant** : (adj.) Qualifie une augmentation croissante de l'épaisseur de bancs successifs le long d'une **coupe\*** géologique. Une série strato-décroissante qualifie le phénomène inverse.

**Stratotype** : (n. m.) Affleurement désigné comme type d'un étage géologique. On considère actuellement que les stratotypes doivent être choisis dans des séries continues et que seule la base de l'étage doit être définie, le sommet de l'étage correspondant à la base de l'étage sus-jacent. A cette conception est associée le terme de « Coupe et point de référence de stratotype mondial » (*Global Stratotype Section and Point*, GSSP) ou « Point stratotypique mondial » (PSM).

**Supraoccipital** : (adj.) Qualifie l'os supraoccipital, littéralement « au-dessus de l'os occipital ». Il s'agit d'un os impair, formant la paroi dorso-postérieure de la boîte crânienne. Il participe à la bordure dorsale du trou occipital (**foramen magnum\***) et est fusionné avec les os **pariétaux\*** (latéralement) et frontaux (antérieurement). Cet os supporte les importantes attaches musculaires du cou.

**Surangulaire** : (adj.) Qualifie l'os surangulaire qui constitue la portion postérieure de la mâchoire inférieure. Il est en contact avec l'os dentaire antérieurement et les os préarticulaire et angulaire ventralement. Cet os présente deux processus bien développés. Le premier est le processus coronoïde (développement antéro-dorsal) venant se plaquer à l'os coronoïde ou au processus coronoïde de l'os dentaire. Le second est le processus rétroarticulaire (développement ventral) venant en contact de manière variable avec les os articulaires et angulaires. Le surangulaire possède une petite fosse glénoïde nommée fosse adductrice, servant d'articulation avec l'os carré ou, plus simplement, d'articulation entre mâchoire inférieure et le crâne. Cette fosse accueille également des nerfs et veines pénétrant la mâchoire à travers des **foramina\***.

**Synsédimentaire** : (adj.) Qualifie un phénomène se produisant durant la sédimentation ou au sein d'un dépôt tout juste formé, encore meuble ou peu compacté.

## T

**Talweg** : (n. m.) Ligne du fond d'une vallée, suivie par le cours d'eau quand il en existe un.

**Terrigène** : (adj.) Se dit de tout élément figuré (fragment de roche, minéral) qui a été arraché à une terre émergée par l'érosion, ainsi qu'aux sédiments qui en sont constitués (les sédiments détritiques par exemple).

**Tibia** : (n. m.) Os long de la jambe. Il est articulé médialement (coté interne) avec la **fibula\*** à ses deux extrémités, et également avec l'astragale à son extrémité distale sur la malléole externe. Cet ensemble forme la partie inférieure de la jambe entre le genou et la cheville. Le tibia porte une importante crête sur son extrémité proximale et pointant antérieurement. Il s'agit de la crête cnémiale, qui sert d'attache aux muscles du genou.

**Titanosaurien** : (n. m. ; lat. : Titanosauria) Clade de dinosauriens **saurischiens\*** **sauropodes\***, herbivores et au long cou. Leur nom est basé sur le genre *Titanosaurus* (« lézards titan »). Ce groupe inclut parmi les animaux terrestres les plus lourds ayant existé, depuis le Jurassique supérieur et jusqu'à la fin du Crétacé. A la fin du Crétacé ce sont les derniers représentant de l'infra-ordre des sauropodes. Bien que généralement de très grande taille, les titanosauriens européens étaient très vraisemblablement le fruit d'une évolution vers un nanisme insulaire compte tenu des pressions environnementales et écologiques. Le nom de groupe « titanosauriens » est généralement utilisé à tort en français. En effet, il s'agit d'un anglicisme du nom latin Titanosauria. Cette nomination est donc à éviter car elle prête à confusion avec la traduction française du nom de genre Titanosaurus, en Titanosaure.

**Thermophile** : (adj.) Qualifie les organismes qui ont besoin d'une température élevée pour vivre.

**Théropode** : (n. m. ; lat. : Theropoda) Sous-ordre de dinosauriens **saurischiens\*** aux « pieds de bête sauvages/monstrueuses ». Ils sont bipèdes et sont principalement carnivores (certains développèrent secondairement des régimes omnivore et/ou herbivore au cours de leur évolution). Les oiseaux sont les seuls théropodes ayant survécu à l'extinction de la crise Crétacé-Paléogène, il y a 66 millions d'années.

**Trochanter** : (n. m.) Excroissance osseuse située sur les membres (humérus et fémurs) servant de points d'attache musculaire.

**Tubérosité** : (n. f.) Saillie osseuse arrondie sur laquelle s'insèrent des muscles ou des ligaments.

**Turbidite** : (n. f.) Couche de sédiments détritiques déposés en une fois par un courant de turbidité. Son épaisseur est généralement de quelques décimètres mais peut atteindre jusqu'à plusieurs mètres. Ces écoulements se forment en milieu aquatique, à l'exception des avalanches de neige.

**Type** : (n. m.) Il s'agit du matériel original de référence attaché à un nom scientifique servant aux premières descriptions et dénominations datées. Ce matériel peut être constitué d'un ou plusieurs spécimens (ou exemplaires) lors de l'identification. La désignation d'un type est obligatoire lors de la publication d'un nouveau taxon. Le type ne représente pas un taxon (genre ou espèce) mais sa dénomination. Afin de faciliter son accessibilité pour la communauté scientifique et pour sa conservation/restauration, le matériel type doit être déposé dans un muséum (d'histoire naturelle) ou dans des collections universitaires.

## U

**Ulna** : (n. f. ; syn. : cubitus) Os long du bras. Il est articulé avec le radius à ses deux extrémités. Il est le plus gros os et le plus postérieur des deux. Cet ensemble forme l'avant-bras. L'articulation proximale (avec l'humérus) présente souvent un important processus (le processus olécrane) correspondant au « coude ».

## V

**Vertèbre cervicale** : (n. f.) Vertèbre constituant la portion de la colonne vertébrale correspondant au cou.

**Vertèbre cervico-dorsale** : (n. f.) Vertèbre marquant la limite entre le cou et le dos. Elle possède des articulations particulières.

**Vertèbre dorsale** : (n. f.) Vertèbre constituant la portion de la colonne vertébrale correspondant au dos. Sauf différenciation notable, ces vertèbres incluent les vertèbres lombaires.

**Vertèbre dorso-sacrée** : (n. f.) Vertèbre marquant la limite entre le dos et les vertèbres sacrées. Elle possède des articulations particulières.

**Vertèbre sacrée** (n. f. ; syn. : vertèbre sacrale) Vertèbre constituant la portion de la colonne vertébrale localisée entre le dos et la queue. Ces vertèbres sont souvent fusionnées ensemble pour constituer un seul os nommé **sacrum\***. Chez les oiseaux, les vertèbres dorsales, les lombaires et premières vertèbres de la queue sont fusionnées aux vertèbres sacrées pour former le synsacrum.

**Vertèbre sacro-caudale** : (n. f.) Vertèbre marquant la limite entre les **vertèbres sacrées\*** et les vertèbres de la queue. Elle possède des articulations particulières.

**Vetarovata** : (n. f.) Système de classification universel parataxonomique des œufs fossilisés. Ce système est composé de trois rangs hiérarchiques de classification : l'oofamille, l'oogenre et l'ooespèce (ensemble regroupé sous le terme d'ootaxon). Le préfixe « oo- » signifie œuf. Ce système n'est pas forcément un miroir de la taxinomie des animaux qui pondent ces œufs. Un oogenre ne correspond pas forcément à un genre précis. Cette imprécision provient largement du fait de l'absence d'embryon à l'intérieur des œufs fossilisés découverts.

## Z

**Zygapophyse** : (n. f.) Désigne une extrémité osseuse servant d'articulation entre deux vertèbres successives. Les zygapophyses se présentent par paire, l'une sur la surface articulaire antérieure (les prézygapophyses) et l'autre sur la surface articulaire postérieure (les postzygapophyses).

### Chapitre I par Joël BOURIDEYS & Michel BURRELLY

Nous souhaitons remercier Gwénola MICHEL pour la mise à disposition des archives du Conseil départemental relatives à la réserve naturelle, ainsi que Anne-Mélina BOURIDEYS pour la traduction.

### Chapitre II par Jean PHILIP

Les travaux sur le terrain ont été facilités par l'aide financière et logistique fournie par la Direction de l'Environnement au Conseil départemental des Bouches-du-Rhône. Que Sauveur AMICO puis Michel BURRELLY, directeurs successifs de la Réserve Naturelle Nationale de Sainte-Victoire en soient vivement remerciés. Loïc VILLIER a participé avec efficacité aux premiers levés et à la rédaction du rapport préliminaire. J'exprime ma gratitude à Monique VIANEY-LIAUD, Thierry TORTOSA et Yves DUTOUR pour les fructueux échanges que nous avons eus sur la stratigraphie du secteur de Roques-Hautes.

### Chapitre III par Isabelle COJAN

Tout d'abord je tiens à remercier les nombreux collègues, doctorants et étudiants qui ont contribué à ces restitutions paléoclimatiques et qui se reconnaîtront. Ces projets, fruits de collaborations avec l'Université de Paris VI, l'Institut de Physique du Globe de Paris et l'University of Southern California, ont été l'occasion de longues missions de terrain pendant lesquelles l'aide des techniciens des Mines et bénévoles ont été précieuses.

Je tiens également à remercier vivement Gilles CHEYLAN, conservateur du Musée d'Aix-en-Provence pour nos longs échanges sur le bassin d'Aix-en-Provence ; Monique VIANEY-LIAUD, Géraldine GARCIA et Thierry TORTOSA pour leur partage du monde des dinosauriens. Un remerciement spécial aux équipes de fouilleurs entraînées par Yves DUTOUR toujours passionné par nos études.

### Chapitre IV par Gilles CHEYLAN

Je remercie l'équipe scientifique du Muséum d'Histoire Naturelle d'Aix-en-Provence, et particulièrement Eric TURINI, pour son aide dans les recherches bibliographiques et l'inventaire des collections, ainsi que Thierry TORTOSA, conservateur de la réserve naturelle, pour sa relecture d'une première version du manuscrit.

### Chapitre V par Géraldine GARCIA et Monique VIANEY-LIAUD

Ces travaux n'auraient pu être menés à bien sans les nombreuses collaborations nouées tout au long de ce travail, collaborations internationales (déjà citées dans le chapitre) et nationales : Xavier VALENTIN (Université de Poitiers) qui a fortement participé à la prospection en Provence notamment depuis Vitrolles (Valentin *et al.*, 2012), Alain CABOT pour le bassin de Villeveyrac-Mèze (Musée Parc des Dinosauriens, Mèze, Hérault), Jean LE LOEUFF (Musée des dinosauriens d'Espéraza, Aude).

### Chapitre VI par Thierry TORTOSA & Eric BUFFETAUT

Nous remercions Annie et Patrick MÉCHIN qui ont eu l'amabilité de nous laisser accéder à leur collection le temps de cette étude et pour le prêt de plusieurs photographies des fouilles menées en 1989. Nous remercions également Frédéric DURELLO (CD13), Gwénola MICHEL (CD13), Yves DUTOUR (MHNAix) et Frédéric PAUVAREL (Service régional de l'Inventaire général du patrimoine culturel PACA) pour leur aide durant la recherche et la redécouverte d'images et documents d'archives (des informations qui ont également été utilisées pour illustrer les chapitres I et IV), ainsi que Anne-Lise CHARRUAULT (ISEM/UM) pour l'accès aux collections universitaires de Montpellier (photo utilisée pour le chapitre V). Les fouilles menées en 2010 et 2011 n'auraient pas pu être réalisées sans l'autorisation et l'accompagnement administratif du Conseil départemental des Bouches-du-Rhône et plus particulièrement grâce à Sauveur AMICO, Michel BURRELLY et Gwénola MICHEL.



DEPARTEMENT13.FR



ISBN : 978-2-9507010-1-5

Direction de l'Environnement, des Grands Projets et de la Recherche  
52, avenue de Saint-Just 13256 Marseille Cedex 20

departement13.fr