

Les calcrètes palustres (tuïres) du Pliocène supérieur de la plaine du Roussillon. Pierres monumentales d'usage historique ancien

*Upper Pliocene palustrine calcretes (tuïres) at Roussillon plain.
Old monumental stone usage*

Pierre Giresse ⁽¹⁾,
Michel Martzluff ⁽²⁾

Géologie de la France, n° 1, 2016, p. 7-25, 14 fig., 4 tabl.

Mots-clés : Pliocène supérieur, calcrètes, pierres monumentales, Roussillon.

Keywords: Upper Pliocene, calcretes, monumental stones, Roussillon.

Résumé

Pendant le Pliocène supérieur, la plaine du Roussillon est le site d'accumulations récurrentes de dépôts fins limoneux où s'intercalent parfois quelques alluvions sablo-graveleuses de forte crue. Ces processus d'accumulation impliquent que vers 4 Ma les manifestations structurales d'effondrement de la plaine étant arrivées près de leur terme, la subsidence n'était plus qu'atténuée.

Nos connaissances sur ces alluvions sont longtemps demeurées fragmentaires car il s'agit de lits d'assez modeste extension, le plus souvent azoïques et aphytiques. Certains bancs fortement cimentés par la calcite et localement appelées tuïres, correspondent le plus souvent à des dépôts fins à l'écart des chenaux de crues, mais aussi plus rarement à des sables plus grossiers. Leurs teneurs en CaCO₃ peuvent atteindre jusqu'à 50, voire 60 %.

La falaise de Terrats qui domine la rivière Canteranne a permis une analyse détaillée de la succession des alluvions du Pliocène supérieur. Chacun des lits n'excède pas un mètre d'épaisseur, leur extension latérale pouvant atteindre parfois quelques centaines de mètres. Les sables des alluvions sont généralement mal classés avec des courbes de distribution plurimodales. Le régime alluvionnaire est demeuré sous le contrôle d'un climat sub-aride à saisons contrastées. Les premières phases de la pédogenèse se sont développées en conditions hydromorphes aboutissant à des gleys plus ou moins bleutés. Les précipitations du ciment carbonaté se sont développées en plusieurs étapes qui ont pu s'initier dès la pédogenèse hydromorphe pour s'achever en conditions évaporitiques, c'est-à-dire proches de la surface. Les

bancs ainsi formés, qualifiés ici de calcrètes, peuvent correspondre à des calcaire gréseux ou à des grès calcaires. Le degré de pigmentation initial a souvent défini la couleur finale plus ou moins foncée du tuïre, on distingue ainsi des « tuïres blancs » et des « tuïres noirs ».

Parallèlement, cette étude a été envisagée en fonction de l'usage de pierres en tuïre dans l'architecture de plusieurs églises romanes et pré romanes du Roussillon et aussi dans quelques édifices remontant à la fin de l'occupation romaine. Ces observations conduisent à envisager une succession de remplois de ces pierres monumentales. Les caractères ou propriétés de ces diverses pierres sont largement semblables à celles des calcrètes étudiés à l'affleurement. En l'absence de vestiges probants de véritables carrières, la localisation de leur site d'extraction est envisagée de manière générale. Ainsi, plusieurs indices indiquent que des gros blocs tombés sur le lit de la rivière Canteranne depuis les falaises d'érosion ont pu être à l'origine d'ateliers opportunistes de taille de la pierre installés de manière intermittente; ces ateliers ont pu alimenter les constructions médiévales de la partie médiane de la plaine du Roussillon entre Terrats et Villeneuve-de-la-Raho, dont notamment plusieurs villages comme Terrats, Nyls et Trouillas (avec sa forteresse templière du Mas Déu).

Abstract

During the late Pliocene, the Roussillon plain was the site of repeated accumulations of fine-grained silty deposits, locally intercalated with sandy-gravelly flood deposits. Such sediment-accumulation processes implied that, around 4 Ma ago, the manifestations of structural collapse of the plain had

(1) Centre de Formation et de Recherches sur les Environnements Méditerranéens – UMR 5110 – Université de Perpignan – Via Domitia, 52, Avenue Paul Alduy – 66860, Perpignan – France giresse@univ-perp.fr.

(2) UMR 7194, Muséum National d'Histoire Naturelle – Université de Perpignan – Via Domitia, 52, Avenue Paul Alduy – 66860, Perpignan – France.

Article présenté le 22 juin 2016, accepté définitivement le 10 octobre 2016.

virtually ceased, and that subsidence had become much attenuated.

Our understanding of these alluvial deposits has long remained fragmentary, as the stream-beds generally were fairly small and the deposits within them mostly devoid of plant- and animal remains. Some beds that are strongly cemented by calcite and locally called "tuïres", generally correspond to fine-grained sediment deposited at some distance from the flood channels, but locally also to more coarse-grained sand. Their CaCO₃ content can be as high as 50 to 60%.

The Terrats cliff, dominating the Canterrane River, has allowed a detailed analysis of this late Pliocene alluvial succession. None of the beds exceeds 1-m thickness, but their lateral extension can be several hundred metres. The alluvial sand is commonly poorly sorted, with multi-modal distribution curves. The alluvial system was controlled by a semi-arid climate with contrasting seasons. The first stages of soil formation developed under hydromorphic conditions, leading to more-or-less bluish gley soils. Precipitation of the carbonate cement took place over several stages, starting with the hydromorphic pedogenesis and ending under evaporitic conditions, i.e. close to the surface. The beds thus formed, here qualified as calcretes, can correspond to sandy limestone of calcareous sandstone. The degree of initial pigmentation generally defined the final colour of the 'tuïre', which can vary from near-white to dark-brown.

In parallel with the geological work, we studied the use of the 'tuïre' stone in the architecture of several Romanesque and earlier churches of the Roussillon and even in some buildings dating from the late stages of Roman occupation. These observations have led us to envisage that such monumental stones were re-used throughout the ages. The properties and aspect of these stones are very similar to those of the calcretes studied in outcrops.

In the absence of clear vestiges of true quarries, the places where they were extracted are unknown, but several indications point at the fact that huge blocks, fallen into the Canterrane river bed from eroded cliffs, may have provided opportunistic stone-mason sites. Here, the blocks were intermittently shaped into the stones used in the medieval and earlier constructions of the median part of the Roussillon plain between Terrats and Villeneuve-de-la-Raho, in particular including the villages of Terrats, Nyls and Trouillas with its Templar fortress of the Mas Déu.

1. INTRODUCTION

Dans la plaine du Roussillon, les paléo-environnements sédimentaires des formations continentales pliocènes postérieures à 4 Ma sont encore peu connus. À ce jour, les bancs carbonatés qu'on trouve parfois interstratifiés dans ces formations, n'ont été remarqués qu'à la faveur de grandes fouilles paléontologiques (Depéret et Donnezan, 1890) ou, plus trivialement, lors des travaux de labourage ou de défonçage des viticulteurs. Ces bancs carbonatés désignés

sous le nom local de tuïres sont ignorés des notices des cartes géologiques (Berger *et al.*, 1993) et ne sont que très succinctement évoqués dans celle de la carte pédologique régionale (Servant, 1970). Seule exception, la notice de la feuille récente d'Argelès-sur-Mer-Cerbère (Laumonier *et al.*, 2015) qui propose une description lithologique rapide de ces dépôts et évoque un paysage pliocène marécageux avec des cuvettes d'inondation aux eaux plutôt calmes, bien que perturbées par des épandages de débordement. Les « encroûtements calcaires » parfois observés sont alors supposés plutôt de nature pédogénétique que lacustre. Nous assimilerons ces bancs calcaires à des calcrètes au sens de précipitations irrégulières des carbonates résultant de processus de dissolution-précipitation successifs liés aux variations cycliques des climats, qu'il s'agisse encore de pédogenèse ou déjà de diagenèse précoce ; ces processus seront discutés dans le paragraphe 7 vers la fin de l'étude.

Nos connaissances demeurent fragmentaires car il s'agit de bancs d'une extension assez faible qui s'avèrent le plus souvent azoïques et aphytiques. Même si on peut occasionnellement observer quelques spectaculaires structures sédimentaires (granoclassements, stratifications obliques) à l'occasion des terrassements de chantiers de construction, il s'agit donc de terrains peu attractifs dans le cadre d'une recherche fondamentale.

Cette étude a été amorcée suite à la mise en évidence de plusieurs emplois et remplois de ces calcrètes locaux dans l'architecture des églises romanes et pré romanes du Roussillon et même dans quelques édifices remontant à l'Antiquité. Une pratique qui est d'autant plus surprenante, qu'à prime abord, ces matériaux, tant en raison de leur aspect extérieur d'une esthétique peu attrayante que de leur cimentation calcaire parfois irrégulière, ne semblaient pas promis à un tel emploi monumental. Dans la plaine du Roussillon, les constructeurs de ces époques anciennes ont dû se contenter de ce qu'ils avaient à portée.

Notre travail analytique considérera (1) plusieurs affleurements de calcrètes sur le terrain, notamment, ceux d'une falaise au dessus du lit de la rivière Canterrane, à côté du village de Terrats afin d'aboutir à une connaissance plus documentée de l'environnement sédimentaire de ces dépôts pliocènes, (2) plusieurs fragments de pierres monumentales de même nature devenus accessibles dans le cours de prospections archéologiques récentes, puis (3) comparera ces différents matériaux afin de discuter des sources de ces pierres monumentales. Enfin, comme il s'agit d'une pierre à plusieurs égards comparable aux tufs largement employés dans les architectures de plusieurs régions voisines, le commentaire sera élargi vers les propriétés favorables qu'ont pu retenir les anciens bâtisseurs quand ils ont employé ce matériau dans la construction des monuments locaux.

2. CADRE GÉOLOGIQUE

2.1. Géologie du Roussillon

La plaine du Roussillon est conséquente de l'évolution structurale d'un bassin d'effondrement initiée depuis l'Oligocène, c'est-à-dire peu après la surrection principale de la chaîne des Pyrénées (Fig. 1). Ce bassin, délimité au nord par la faille de Prades et au sud par celle des Albères, a constitué pendant une grande partie des temps néogènes une zone d'active sédimentation alimentée par les produits d'érosion de reliefs fraîchement apparus (Calvet, 1999; Duvail *et al.*, 2005).

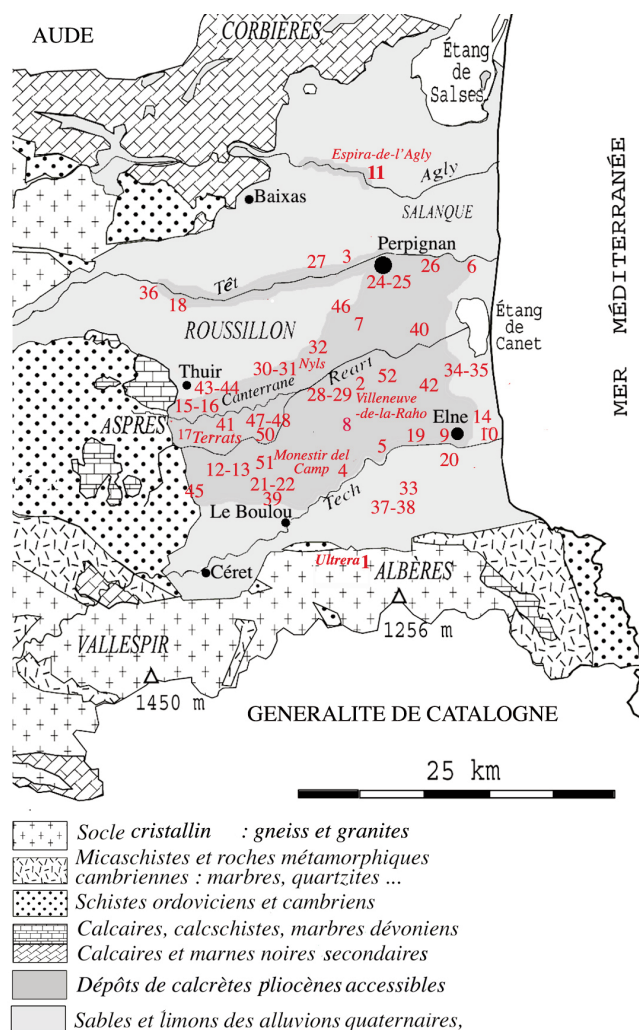


Figure 1 - Contexte géologique de la plaine du Roussillon et extension des affleurements de calcrètes du Pliocène supérieur. Les numéros renvoient aux monuments historiques qui sont détaillés par commune dans le tableau 4.

Figure 1 - Geologic context of the plain of Roussillon and extension of the Upper Pliocene calcrete outcrops. The numbers referred to the historic monuments which are listed in Table 4.

Après la spectaculaire régression fini-miocène du Messinien, le Roussillon, dès le début du Pliocène, est le site d'une importante transgression marine dont les témoins les plus hauts sont aujourd'hui à la cote de 80 m NGF (Calvet,

1986; Clauzon, 1990). Cet épisode, allant de 5,3 à 3,4 Ma, correspond à l'étage du Zancéen pendant lequel se met en place un golfe marin indenté par deux grandes rias qui s'avancent jusqu'à Prades dans la vallée de la Têt et jusqu'à Cérét dans celle du Tech. L'accumulation des matériaux charriés par les paléo-Têt et paléo-Tech aboutit à l'empilement de plusieurs unités morpho-sédimentaires constituées, en allant du continent vers le large, d'alluvions grossières de paléo-chenaux, de sables marins (faciès de plage ou de mangrove) et enfin de silts et d'argiles du domaine marin profond. Graduellement, la ligne de rivage se retire vers sa position actuelle et toutes les accumulations de la deuxième moitié du Pliocène comme celles du Quaternaire seront désormais continentales sur toute l'étendue de la plaine du Roussillon. D'après les sondages d'Elne, de Montescot et d'Argelès-sur Mer, le toit du Pliocène marin se situe entre 117 et 128 m de profondeur (Gottis, 1958. Duvail *et al.*, 2005), mais en allant vers le pied des Aspres, d'autres forages hydrogéologiques ont permis de reconnaître le toit de ce Pliocène marin entre 0 et 50 m (Salvayre et Sola, 1975; Suc, 1976; Magné, 1978) (Fig. 2). L'attribution au Pliocène des faciès détritiques des Albères et des Aspres a été proposée en bordure des vallées du piémont (Calvet, 1986) où, cependant, aucun témoin marin n'a pu être décelé (Laumonier *et al.*, 2015).

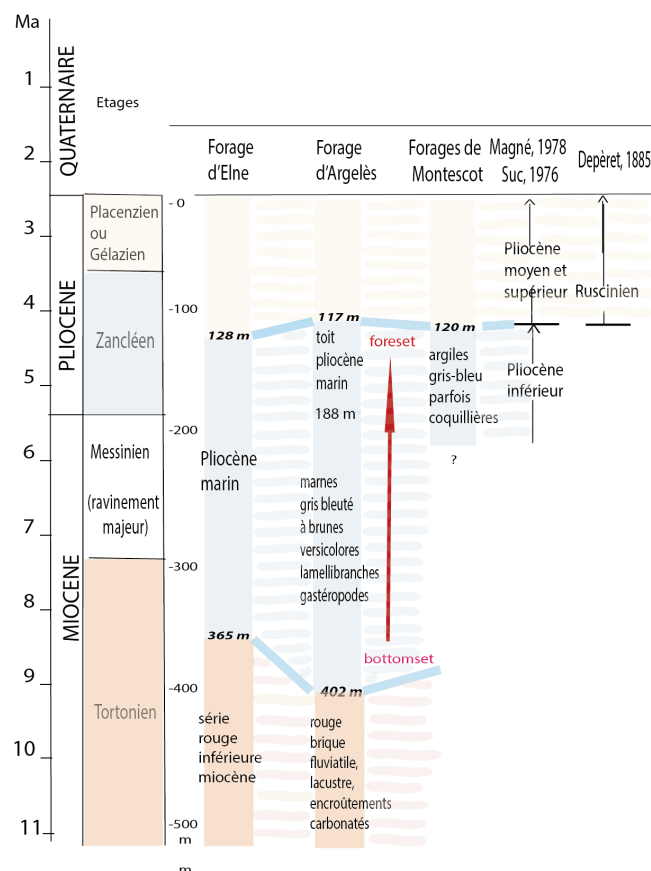


Figure 2 - Rappel stratigraphique du Néogène et essai de corrélation des sondages de la Plaine du Roussillon.

Figure 2 - Stratigraphy of the Neogene of the Plain of Roussillon with attempt to correlate different boreholes.

Le Pliocène supérieur continental affleure surtout dans le bassin du Réart, entre la vallée de la Têt et celle du Tech (Fig. 1) (Berger *et al.*, 1993) où, globalement, on observe une évolution à partir de faciès proximaux d'amont aux débouchés des cônes caillouteux vers des faciès distaux d'aval à limons jaunes silteux, niveaux à concrétions calcaires parfois qualifiés de « marnes concrétionnées » (Laumonier *et al.*, 2015). Les dépôts caillouteux ou graveleux ou encore les bancs cimentés par la calcite (*cf.* notre tuïre) sont à l'origine de buttes témoins dont le relief a souvent été mis à profit dès la Protohistoire pour l'installation des premières bourgades et de leurs premières défenses fortifiées.

C'est au sein de ce Pliocène continental qu'on observe les bancs calcaires du tuïre. Des accumulations limoneuses bleutées à gris foncé ou noirâtre ont subi une première pédogenèse hydromorphe en milieu réducteur, la teinte du dépôt témoigne d'un degré extrême d'anoxie avec cependant parfois des taches brunes ou de couleur rouille caractéristiques des pseudo-gleys (Servant, 1970). Sur le terrain, on distingue grossièrement un tuïre beige clair (dit tuïre blanc) d'un tuïre grisâtre (dit tuïre nègre), ce dernier semblant plus répandu vers le sud de la plaine du Roussillon. La notice de la carte pédologique d'Argelès-sur-Mer et Perpignan (Servant, 1970) fait référence à « des calcaires marno-argileux du Pliocène lacustre » et indique que la profondeur utile du sol agricole peut-être limitée par l'obstacle d'un horizon induré qui fait obstacle à la pénétration des racines ; il est fait allusion ici à Taxo, près d'Elne, où l'on observe de l'argile noire, le tuïre nègre, ensevelie sous un manteau sableux.

Enfin, suite aux grandes glaciations du Quaternaire, le toit du Pliocène a été localement incisé par les principales rivières de la Plaine du Roussillon (Agly, Têt, Réart, Tech). Ainsi, au cours du dernier million d'années, se sont mises en place les nappes alluviales des terrasses successives qui sont souvent emboîtées. Leur extension et surtout leur puissance sont relativement modestes à l'échelle de la plaine du Roussillon qu'elles ne recouvrent que partiellement (Calvet *et al.*, 2015).

2.2. État des connaissances sur le Pliocène continental

Vers la fin du XIX^e siècle, de très importantes recherches paléontologiques ont permis de caractériser la faune tropicale continentale pliocène du célèbre gisement de la Serrat d'en Vaquer à Perpignan (Depéret et Donnezan, 1890). Elle comptait parmi les plus riches du monde car renfermant pas moins de 46 espèces de vertébrés terrestres ou fluviatiles à la base de la définition de l'étage continental du Ruscinién (Depéret, 1885). Les pièces osseuses, souvent brisées ou émoussées, ont été transportées par les courants et ensevelies au sein des limons humides. Leur tissu devenu friable n'a été fossilisé que grâce aux précipitations des carbonates diagénétiques alors que les faunes de mollusques se trouvent le plus souvent préservées à l'état de moules internes. Puis, les paléontologues ont repéré d'autres vestiges

d'ossements en plusieurs autres sites de la plaine du Roussillon. En fonction des révisions chronostratigraphiques récentes basées sur les dents des petits rongeurs du site karstique de Mont-Hélène, on s'accorde pour dater ces dépôts d'environ 4 Ma (Aguilar *et al.*, 1986), voire de 3,8 Ma. Cet âge se trouve confirmé dans plusieurs petits gisements fossilifères comme ceux de Terrats (Michaux, 1976), de Villeneuve-de-la-Raho (Mein et Aymard, 1985) et de Thuir (Aguilar *et al.*, 1991).

Cette « grande faune » de Perpignan témoigne d'environnements forestiers marécageux encore chauds (tortues terrestres géantes significatives de l'absence de gel, mastodontes brouteurs de feuilles, suidés, primates, cervidés, petits ursidés arboricoles), mais elle comporte aussi de nombreux herbivores de milieux ouverts (*Hipparion crassum*, *Gazella borbonica*, plusieurs antilopes de forte taille comme *Alephis Lyrix* et *A. Tignerensis*). Les rongeurs témoignent également de paysages en mosaïque, associant espaces forestiers et espaces ouverts. Le climat chaud et sec était subtropical, les Taxodiacées (dont le Cyprès chauve de Floride) n'avaient pas encore disparu. Ce climat, qui peut être comparé à celui de l'Asie du Sud-Est, a connu par la suite des influences de plus en plus méditerranéennes.

3. AFFLEUREMENTS ET MÉTHODES D'ÉTUDE

3.1. Affleurements

Le tuïre beige clair est observé en plusieurs sites voisins tous au sud-ouest de Perpignan: Serrat d'en Vaquer, Mas Coste (actuel parc des sports de Perpignan) où une nouvelle tortue géante a été récemment découverte, colline de la Cité universitaire, nouveau rond-point du Mas Balade (domaine Lacassagne). Il s'agit de bancs carbonatés de faible puissance et de courte extension qui, ici, n'ont vraisemblablement pas pu être employés comme pierre monumentale.

Plusieurs autres sites (Thuir, Trouillas, Villemolaque, etc.) présentent des tuïres de couleur grise ou grise-bleutée qui sont assez communément répandus dans la plaine du Roussillon principalement entre la Têt et le Tech où ils sont redoutés des viticulteurs. Miat (1936) évoque dans l'Aspre ces « terra-prim » (terres maigres) du Pliocène sablo-caillouteux, sorte de ballast qui résiste d'autant mieux à l'érosion des ruissellements superficiels qu'il est « souvent lardé de bancs calcaires, le tuïre ». Le même auteur fait aussi allusion à la présence de calcaires à la base des buttes pliocènes d'Elne, de La Tour-bas-Elne et de Saint-Cyprien où ils sont recouverts d'un épais manteau de « terrefort » (terres limoneuses agricoles). Ces couleurs évoquent les faciès « d'argiles tourbeuses noirâtres avec un ou plusieurs lits de lignite impur » signalés par les premiers auteurs (Depéret et Donnezan, 1890).

Vers le sud de la plaine du Roussillon, des tuïres gris bleuté ou jaunes, parfois associés à des graviers de quartz très émoussés, affleurent à la base des talus d'incision des cônes de déjection quaternaires ; ce sont les sites des vallées torrentielles de la Massane et de ses affluents, ainsi que ceux de plusieurs incisions entre Saint-André et Sorède. Précisons ici qu'on observe aucun témoin de sédimentation marine qu'on ne trouvera que plus à l'ouest, en continuité avec les couches marines du Boulou (Laumonier *et al.*, 2015). Si l'observation directe à l'affleurement de ces tuïres gris bleuté est assez difficile, par contre, nous verrons qu'ils sont bien représentés à la base des murailles ou dans les parements de nombre des églises romanes voisines (Llupia, Nyls, Trouillas, Saint-André, Saint-Génis-des-Fontaines, Sorède).

Ces tuïres gris sont parfois mis à découvert dans les vignobles de l'Aspre et des Albères à la faveur de l'érosion naturelle (versants d'incision torrentielle, bas-fonds de ruisseau) ou de défonçage des terres dans certaines communes de l'Aspre (Tresserre, Passa et Fourques notamment). Ce sont des dépôts assez localisés, mais ils peuvent être aussi beaucoup plus largement étendus à la faveur de paléo-dépressions : ainsi tout le sous-sol du lotissement du Petit-Clos à la sortie ouest de Perpignan est composé d'un tuïre gris faiblement carbonaté qui a servi de matière première à l'artisanat romain de céramique du domaine. Parfois, l'étendue de ce tuïre plus ou moins imperméable se définit à l'échelle du sous-sol de quasiment toute une commune comme celle de Canohès ou de Villeneuve-de-la-Raho dont elle a contrôlé jusqu'à une époque récente la pérennité des marécages.

3.2. Méthodes d'étude

Les prospections de terrain ont permis de repérer et d'échantillonner plusieurs bancs de calcrète affleurant sur les versants et surtout sur les falaises d'érosion dominant les lits du Réart et de la Canterrane. Parmi ces dernières, près de Terrats, une coupe représentative a été choisie en fonction de sa hauteur d'environ 12 m et de sa proximité de plusieurs monuments romains où ce calcrète a été largement utilisé par les bâtisseurs (Terrats, Mas Déu, Nyls, Trouillas). Au regard des changements lithologiques les plus caractéristiques, quatorze prélèvements ont été réalisés par descente en corde de rappel. Plusieurs échantillons de roches monumentales (pierres de rebut ou fragments tombés) ont fait l'objet d'analyses complémentaires. La couleur des sédiments a été définie en fonction du code Munsell Soil Color Book (2013).

Les observations macro- et microscopiques ont été réalisées sur les échantillons entiers, puis décarbonatés après attaque à HCl dilué. Cette attaque permet de déduire directement les teneurs en carbonate, puis d'observer au microscope les particules insolubles à l'état meuble. L'analyse élémentaire de la matière organique a été conduite avec un analyseur Variomax CN Elementar, elle consiste à mesurer le carbone organique et l'azote avec le standard international

(AOAC, DIN/ISO, EN) et une température de combustion de 1 200 °C.

Les fractions insolubles ont été lavées sur un tamis à maille de 63 µm, la fraction sableuse ainsi recueillie a fait l'objet d'observations microscopiques et d'une analyse texturale. La granulométrie a été réalisée sur une colonne de 15 tamis (progression AFNOR), disposée dans une tamiseuse (durée d'agitation de 10 minutes, intensité des vibrations portée à 20). Plusieurs paramètres de positions ont été calculés, les paramètres de dispersions ont abouti au calcul du triage exprimé par $(D_{84} - D_{16})/4 + (D_{95} - D_5)/6.6$ d'après Folk et Ward (1957).

Enfin, plusieurs observations microscopiques ont été faites à partir de lames minces et des analyses diffractométriques R.X et ont permis de vérifier la composition de la fraction carbonatée et de la fraction insoluble argileuse.

4. LA COUPE DE TERRATS

Le Réart et son affluent la Canterrane sont des cours d'eau affectés par des crues intermittentes, mais violentes, qui ont déterminé des incisions de 10 à 15 m de profondeur dans le Pliocène supérieur. Ces deux cours d'eau sont parfois bordés par des falaises d'érosion dégagées sur plusieurs centaines de mètres de long offrant ainsi des perspectives favorables à l'étude de l'accumulation sédimentaire.

A côté du village de Terrats, la falaise pliocène de près de 12 m qui domine le lit de la Canterrane, présente une succession sédimentaire de couleur beige ou grisâtre qui est jalonnée par cinq à six bancs calcaires indurés (tuïres) un peu en relief et séparés par des bancs sablo-limoneux plus faiblement cimentés (Fig. 3 et 4, Tabl. 1). On note de fréquentes structures en motte de taille pluri-centimétrique, ce sont des masses claires dans une matrice plus sombre. Des empreintes cylindriques et verticales de racine végétales, parfois entrelacées, sont généralement remplies de silts et aboutissent à une fabrique grossièrement prismatique. Plus rarement, on trouve aussi des sortes d'empilements de plaquettes. Les remplissages de fentes de dessiccation ne sont que rarement observés. Le dépôt pliocène est couronné par une accumulation colluviale caillouteuse fini-würmienne de deux ou trois mètres qui constitue le sol viticole du piémont des Albères (Fig. 3).

4.1. Teneurs en carbonate et en carbone organique

Les teneurs en carbonate sont variables allant de 10 à 25 % pour certains niveaux sablo-limoneux pour atteindre jusqu'à 52 % dans les bancs les plus calcaires. Ces teneurs permettent de définir une succession de calcaires gréseux (plus de 50 % de CaCO_3) et surtout de grès calcaires ou encore de sables et de limons plus faiblement cimentés (Fig. 5).



Figure 3 - Vue générale de la falaise de Terrats et positions des échantillons ; les tuïres correspondent aux bancs en relief.

Figure 3 - Overview of the Terrats cliff and location of the studied samples; tuïres correspond to the prominent calcareous banks.



Figure 4. Autre aspect de la falaise sur berge de la rivière Canterrane. a - succession des faciès types. 1 : dépôt beige en motte avec structures cylindriques d'anciennes racines, 2 : horizon gris bleuâtre gleyifié, 3 : autre dépôt beige à structures cylindriques; les dépôts beiges cimentés sont légèrement proéminents sur l'horizon de gley. b. détail des moules de structures cylindriques dues aux racines sur un bloc tombé du dépôt 1.

Figure 4. Additional view of the cliff along the Canterrane River. a - typical facies succession. 1: beige deposit with mottle and cylindrical structures of former roots, 2: bluish grey gleyized horizon, 3: other beige deposit with cylindrical structures; the cemented concrete beige deposits are slightly prominent above the gley horizon; b - detail of the cylindrical structures related to the moulds of roots on a block fallen from the deposit 1.

Hauteur (m)	Lithologie	% sables	% CaCO ₃	Dispersion	% C org
11,75	Sable limoneux beige ocre	1	27	Mal trié	0,04
10,90	Calcaire beige	7	52	Modérément trié	0,14
9,75	Sable beige faiblement carbonaté	63	7	Mal trié	0
8,75	Sable fin grisâtre	35	16	Mal trié	0,04
7,75	Grès calcaire rouille	5	37	Mal trié	0,34
6,75	Grès calcaire beige foncé	52	40	Mal trié	0,15
6,25	Grès marneux vert grisâtre	13	30	Mal trié	0,04
5,75	Sables fins argileux marrons	21	15	Mal trié	0,04
5	Calcaire beige	15	48	Modérément trié	0,04
4,25	Sables fins beiges	46	5	Mal trié	0,06
3,5	Grès calcaire beige à reflets verdâtres	0,5	46	Mal trié	0,07
2,75	Grès calcaire silteux	0,5	32	Mal trié	0,07
1,75	Grès calcaire beige foncé	5	45	Mal trié	0,2
1	Grès calcaire beige ocre	0,5	48	Mal trié	0,45

Tableau 1 - Données analytiques des niveaux de la coupe de Terrats.

Table 1 - Analytical data for levels of the Terrats section.

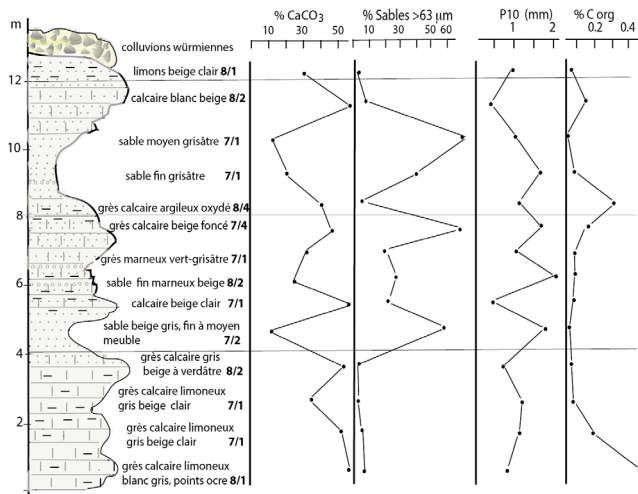


Figure 5 - Schéma lithologique de la coupe pliocène de Terrats au-dessus de la Canterrane en regard de teneurs en carbonate, en sable et de leur percentile 10 (P10 en millimètres) et en carbone organique; les codes couleur sont déduits de la charte Munsell de la couleur des sols.

Figure 5 - Lithological succession of the Pliocene Terrats section along the Canterrane River with indications of its contents in carbonate, sand and including their percentile 10 (P10) and organic carbon; the color codes are deduced from the Munsell soil-color charts.

Il est à noter que la couleur beige à ocre (7.5YR 8/4-7/4) ou parfois grisâtre (5YR 8/1-8/2, 7.5YR 7/1, 7/2, 8/2, 10YR 7/1) des bancs ne présente pas de relation évidente avec les teneurs en carbonate; certains grès calcaires grisâtres observés à 7 m, puis à 9 et 10 m au dessus de la base de la coupe montrent ainsi des taux de carbonate variables, mais plutôt modestes (10 à 30 %). À quelques centaines de mètres en amont, quelques gros blocs métriques de calcaire beige et gris attaqués par l'érosion et tombés sur le lit de la rivière renferment jusqu'à 75 % de CaCO₃, une concentration parmi les plus élevées de toute cette étude.

Les matières organiques sont peu abondantes et dispersées, les teneurs en carbone organique demeurent inférieures à 0,5 % (Fig. 5, Tableau 1). Seules quatre valeurs sont plus significatives: 0,45 % à 1 et à 2 m, 0,35 % à 8 m et 0,15 % à 11 m, elles correspondent toutes à des faciès faiblement sableux. Ces concentrations ne contrôlent pas systématiquement la pigmentation du sédiment puisque certains niveaux grisâtres contiennent moins de 0,1 % de carbone organique. Corrélativement, les teneurs en azote sont très faibles et souvent en-deçà de la limite de détection. Les rapports C/N n'ont pu être évalués que dans trois niveaux

légèrement plus organiques, ils atteignent 15 à la base, 11 à 8 m et 7 à 11 m.

4.2. Observations microscopiques

Les microfaciès des mottes pluri-centimétriques montrent des colorations gris verdâtre ou ocre clair en fonction de la progression du front d'oxydation, des cutanes d'oxydes de fer et de manganèse sont parfois observées à la périphérie de ces mottes. Des veines et des amas plus calcitiques définissent la charpente de la roche en léger relief blanchâtre à la surface de cassure de la roche, ils dessinent un réseau dont la teinte plus ou moins sombre est liée à l'incorporation de traces de carbone organique dans les cristaux calcitiques ; on relève aussi l'abondance de très petits débris végétaux noirs. La cimentation initiale est composée de micrites qui ont précipité dans un premier temps où elles se trouvent parfois associées à des microsparites. Dans un deuxième temps, des grandes plages sparitiques se sont développées, venant en remplacement des micrites ou en colmatage tardif des cavités restantes. La cimentation de certains sables ou grès souvent argileux demeure inachevée, dans ces cas, il s'agit plutôt de dépôts d'amas sparitiques ou microsparitiques en îlots isolés (Fig. 6). Toutes les calcites analysées en diffractométrie R.X s'avèrent être des calcites très faiblement magnésiennes (< 4 mole % MgCO_3).

L'observation microscopique, après lavage des grains du sable, montre une prédominance des quartz associés en part variable aux feldspaths (orthose et plagioclases) et aux micas, plusieurs grains demeurent encore à l'état polyminéral (quartz, feldspaths, voire micas toujours attachés). Les grains de quartz sont majoritairement non-usés et mats, la proportion de grains émoussés augmente dans les sables les plus grossiers et dans les graviers où figurent aussi quelques débris de roches (grés, micaschistes et schistes siliceux). Des petites concrétions d'oxy-hydroxydes de fer ou d'oxydes de titane (ilménite) sont plus abondantes dans les niveaux les plus fins notamment entre 0 et 3 m et entre 6 et 8 m de hauteur. Les fibres végétales sont ubiquistes dans la plupart des sables, notamment dans les plus fins, c'est à dire encore dans ces mêmes intervalles de 0 à 3 m et de 6 à 8 m.

4.3. Analyse texturale

La distribution verticale des teneurs en sables ($\phi > 63 \mu\text{m}$) est irrégulière et se trouve souvent anti-corrélée avec celle des carbonates car il s'agit des deux principales composantes du sédiment (Fig. 5). Toutefois, cette opposition n'est pas toujours respectée car la fraction insoluble, habituellement de nature sableuse, est parfois à dominante silteuse, voire un peu argileuse comme dans les quatre premiers mètres de la coupe, puis dans les niveaux à 8,5 m et à 12 m (Fig. 5, Tableau 2).

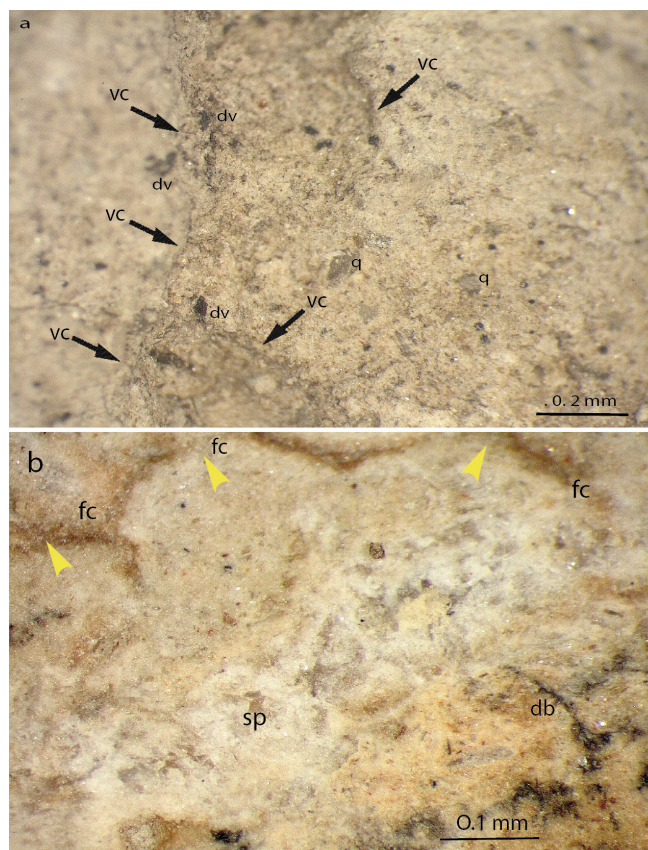


Figure 6 - Microfaciès de la coupe de Terrats. a - 3,5 m, veines carbonatées (vc) du grès en léger relief (flèches noires) et pigmentées par le carbone des petits débris végétaux (dv), présence de petits quartz (q). b - 4,5 m, motte ou cellule ocre clair de précipitation de la calcite avec sparites au cœur (sp), front de progression (fc) ou limite (flèche jaune) souligné par un liseré d'impuretés, ici oxydes de fer, débris végétaux (db).

Figure 6 - Microfacies within the Terrats section. a - 3,5 m, slightly prominent carbonate veins (vc) in the calcareous sandstone (black arrows). These veins are pigmented by the organic carbon derived from small plant fragments (dv). Note also the presence of small quartz (q). b - 4,5 m, mottles or ochre cells resulting from calcite precipitation with sparites in the core (sp) and precipitation front (fc) or limit (yellow arrow) around ; these latters are underlined by a fringe of impurities, here composed of iron oxides and plant fragments (db).

mediane (mm)	Moyenne graphique		PARAMETRE DE DISPERSION	
	ϕ	Definition	valeur	Definition
0.28	1.85	Sable moyen	1.40	Mal trié
0.09	3.18	Sable très fin	0.74	Modérément trié
0.18	2.06	Sable fin	1.30	Mal trié
0.33	1.51	Sable moyen	1.57	Mal trié
0.11	2.65	Sable fin	1.35	Mal trié
0.51	0.89	Sable grossier	1.24	Mal trié
0.23	1.90	Sable moyen	1.35	Mal trié
0.38	1.25	Sable moyen	1.68	Mal trié
0.12	3	Sable très fin	0.78	Modérément trié
0.35	1.30	Sable moyen	1.51	Mal trié
0.10	2.71	Sable fin	1.18	Mal trié
0.41	2.34	Sable fin	1.53	Mal trié
0.31	1.77	Sable moyen	1.29	Mal trié
0.13	2.71	Sable fin	1.04	Mal trié

Tableau 2 - Analyses texturales des sables de la coupe de Terrats.

Table 2 - Textural analyses of the sands of the Terrats section.

L'analyse granulométrique a été restreinte à la fraction sableuse. Les médianes sont très variables, proches de 0,09 mm dans le cas des sables les plus fins, elles atteignent 0,51 mm dans les sables moyens à grossiers. Le percentile 10 exprime ici les plus gros grains transportés, c'est à dire l'énergie maximale du transport, ses valeurs sont hétérogènes puisque le maxima s'élève à 1,81 mm dans un sable moyen à 5,50 mètres alors que le minima de 0,23 mm à 11 mètres correspond à un sable fin à très fin. La corrélation attendue de ce percentile avec la teneur en sable ne se trouve qu'assez irrégulièrement vérifiée (Fig. 3).

Les calculs de la dispersion indiquent que la grande majorité des sables est mal triée, la plupart des valeurs sont supérieures à 1, voire à 1,5. Deux sables font exception, il s'agit de sables très fins à 5 m et 11 m qui présentent respectivement des valeurs de 0,78 et de 0,74 correspondant à des sables modérément triés (Tabl. 2). Les courbes de distribution illustrent davantage le mauvais triage déjà évalué par le calcul statistique : la majorité des courbes est en effet bimodale, voire même trimodale. Les rares exemples de distribution unimodale correspondent aux sables les plus fins observés à la base de la coupe (refus à 0,1 mm), à 3,5 m (refus à 0,1 mm), à 8 m (refus à 0,08 mm) et vers 11 m (refus à 0,8 mm). D'autres courbes de distributions montrent la prédominance de sables moyens à grossiers caractérisés par des modes variés (refus de 0,5 mm et 0,315 mm à 1,5 m, refus à 0,5 et 0,315 mm à 3 m, refus à 0,05 et 0,315 mm à 7 m, refus à 0,5 et 0,315 mm à 9 m et refus à 0,5 mm à 12 m). Enfin, la présence de graviers dans quelques sédiments correspond

dans tous les cas à un refus à 1,6 mm que l'on trouve aussi à 4 m, à 5,50 m, à 7 m, à 8 m et à 9 m de hauteur (Fig. 7a, b, c).

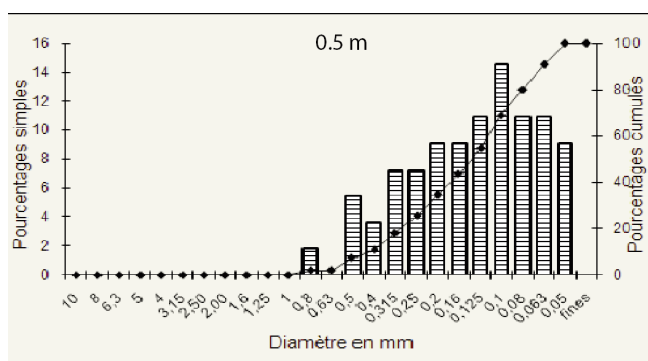
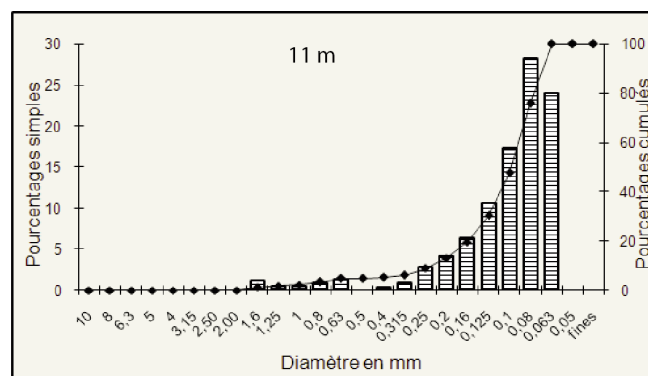


Figure 7b - Courbes de distribution granulométriques des sables des alluvions de la coupe de Terrats. Exemples de courbes bimodales.

Figure 7b - Granulometric distribution curves of sands from the alluviums of the Terrats section. Bimodal curves examples.

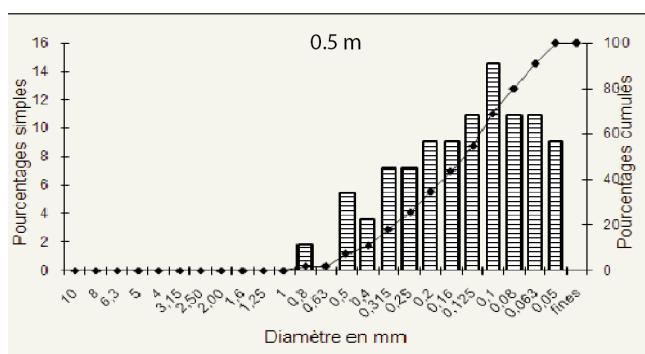
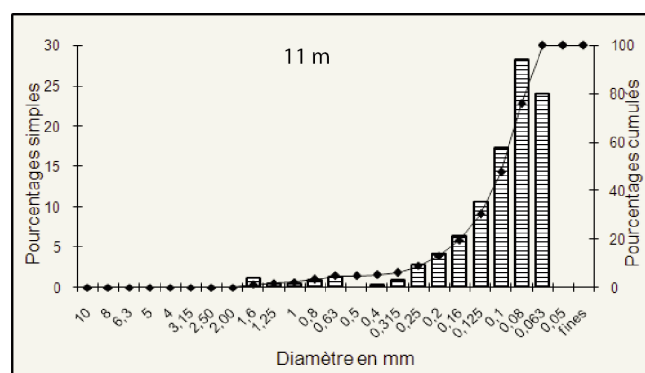


Figure 7a - Courbes de distribution granulométriques des sables des alluvions de la coupe de Terrats. Exemples de courbes unimodales.

Figure 7a - Granulometric distribution curves of sands from the alluviums of the Terrats section. Unimodal curves examples.

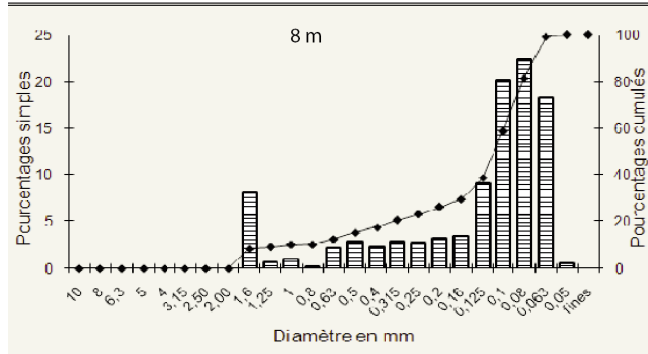
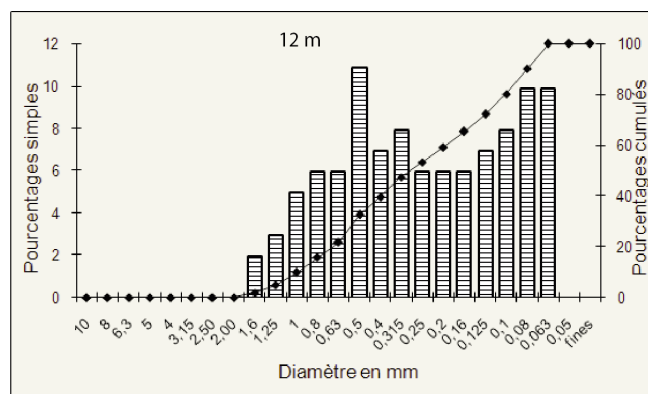


Figure 7c - Courbes de distribution granulométriques des sables des alluvions de la coupe de Terrats. Exemples de courbes polymodales.

Figure 7c - Granulometric distribution curves of sands from the alluviums of the Terrats section. Plurimodal curves examples.

L'étude des minéraux argileux du Pliocène continental (Laumonier *et al.*, 2015) montre une large prédominance des smectites (allant jusqu'à 80 % du spectre total), associées à l'illite et à la kaolinite, voire à des traces de palygorskite. Nous avons pu analyser le cortège argileux de plusieurs niveaux des coupes de Terrats et de Villeneuve-de-la-Raho. Ce cortège est effectivement dominé par la montmorillonite (60 à 80 %) associée à des mélanges variables d'illites ouvertes et d'interstratifiés illite-smectite, la kaolinite faisant figure de composant mineur. La montmorillonite est l'aboutissement de l'hydrolyse dans des sols à drainage médiocre et irrégulier, notamment dans les vertisols subtropicaux à forte évaporation saisonnière. L'homogénéité des cortèges argileux des différentes alluvions de la plaine et des dépôts marins (Monaco, 1971) indique le caractère essentiellement détritique de cette composante argileuse quel que soit le corps sédimentaire considéré. Au contraire des carbonates, aucune néoformation argileuse ne peut être envisagée.

4.4. Commentaires

Si l'on s'en tient aux données de l'analyse texturale, on envisage un paysage pliocène de plaine fluviale mouvant dans le temps et dans l'espace où s'accumulent des alluvions grossières proches des axes de chenaux et des limons fins de plaines de débordement. Les épisodes de crue et de décrue sont illustrés par une distribution plurimodale très variable du sédiment. Les graviers des crues sont toujours caractérisés par un refus à 1,6 mm qui signale les épisodes de la plus grande compétence des rivières pliocènes. Les modes des fractions sableuses sont très variables, mais le refus à 0,5 mm est le plus fréquent. Les dépôts sableux fins des décrues ou des marges sont souvent caractérisés par un mode à 0,08 mm. Mais on ne peut écarter que parfois plusieurs épisodes distincts de transport aient pu se trouver associés à l'échelle d'un même prélèvement. Les hétérogénéités des valeurs des médianes, du percentile 10 et de la moyenne graphique illustrent cette forte diversité d'une sédimentation de plaine marécageuse périodiquement envahie par des chenaux de crues.

Dans ces conditions de sédimentation généralement grossière et de forte énergie, la matière organique végétale n'est parvenue que rarement à s'accumuler en quantité. Seuls quatre niveaux montrent des concentrations autorisant une analyse détaillée. Les rapports C org/N (entre 15 et 7) caractérisent une matière organique terrigène assez fortement dégradée.

Il faut noter qu'en fonction des phénomènes d'oxydation post-sédimentaire, la relation entre la pigmentation grise du dépôt et la concentration en matière organique n'est pas parfaitement respectée. Si l'on admet que la majorité de ces dépôts marécageux a subi une première évolution pédogénétique hydromorphe en conditions plutôt anoxiques, les horizons des sols ont dû être affectés par une pigmentation gris bleuâtre typique du gley, puis

éventuellement gris-bleu et ocre (pseudo-gley). Si la matière organique végétale (fibres notamment) s'y trouve récurrente sur toute la verticale de la coupe, elle a été souvent dispersée et dégradée au cours de l'oxydation post sédimentaire (ainsi aucun pollen ne s'y trouve conservé ...). Dès lors, la conservation de la teinte grise bleuâtre (le tuïre « nègre » local) s'avère aléatoire car elle dépend principalement de l'intensité de cette oxydation. La précipitation calcitique des ciments vient se superposer au processus pédogénétique, mais sans nécessairement avoir une influence déterminante sur la pigmentation. De très petites teneurs d'un carbone organique à l'état diffus peuvent suffire à produire et à perpétuer cette teinte grisée.

Les teneurs élevées en carbonate expriment un processus qui a pu débuter dès la pédogenèse, mais qui s'est poursuivi en conditions de diagenèse précoce en milieu probablement évaporitique, c'est-à-dire sous de très faibles tranches d'eau. Les cimentations les plus achevées affectent généralement des dépôts fins à l'écart des chenaux de crues, mais peuvent aussi quelques fois concerner des sables plus grossiers comme c'est le cas dans la coupe vers 7 m de hauteur.

5. QUELQUES AUTRES AFFLEUREMENTS DE CALCRÈTE

Plusieurs autres sites du Roussillon permettent l'observation des calcrètes pliocènes pratiquement à l'affleurement. Il peut s'agir de flancs de vallée ou de falaises d'érosion de berge de la Canterrane ou du Réart comme dans l'exemple précédent, ou bien de petites collines qui représentent des buttes témoins comme celle du Serrat d'en Vaquer, de la cité universitaire, du mas Lacassagne ou de plusieurs versants dominant le lac de Villeneuve-de-la-Raho. Parfois aussi, ce sont des fonds de dépression ou des versants qui sont atteints à l'occasion de labours ou de défonçages profonds des terres viticoles (Tressère, Fourques, Canohés, Bages, Toulouse) (Fig. 1b).

Les couleurs des calcrètes sont variées (blancs, beiges ocres, gris clair, gris bleuté) et ont permis de séparer empiriquement les tuïres « blancs » (surtout beige clair) et les tuïres « noirs » (surtout grisâtres) (Servant, 1970). Leurs textures sont également variées, le plus souvent limoneuses avec une faible teneur en argile, mais aussi sableuses avec une petite part de graviers. La variante la plus conséquente a trait à la teneur en carbonate du calcrète qui définit sa dureté, certains bancs « arment » l'accumulation sédimentaire face à l'érosion.

Les successions lithologiques ayant déjà été analysées sur la coupe de Terrats, dans les autres affleurements, nous ne ferons que résumer caractères généraux des macrofaciès et des microfaciès pour n'insister que sur quelques aspects plus originaux.

5.1. Teneurs en carbonate, textures et couleurs

Nous avons déjà signalé, sur le lit de la Canterrane, la présence de gros blocs métriques de calcrète beige tombés du haut des falaises qui montrent des teneurs exceptionnelles en carbonate puisque atteignant jusqu'à 75 %. Le sable très fin qu'ils renferment est mal trié à l'égal de ceux des bancs de la coupe de Terrats, mais la courbe de distribution est cependant unimodale (refus à 0,08 mm). La teneur en carbone organique atteint 0,42 %, soit une des valeurs les plus élevées de cette étude (Tabl. 3).

À Passa, le calcrète affleurant sur le versant du Réart révèle une teneur en carbonate équivalente à celles de la coupe de Terrats, son sable très fin est modérément trié et la courbe de distribution est bimodale (refus à 0,16 et 0,08 mm). La teneur en carbone organique atteint 0,3 % et le rapport C/N est voisin de 10.

Sur le versant oriental dominant le lac de Villeneuve-de-la-Raho, trois niveaux affleurant sur la falaise ont été analysés. Ils présentent des teneurs en carbonate assez homogènes (39 à 48 %) qui sont un peu en-deçà de celles de la falaise de Terrats. Ces grès calcaires renferment des fractions insolubles hétérogènes composées de sables fins à très fins avec des triages variés (allant du mal trié jusqu'au bien trié). Les histogrammes de fréquence, à l'égal de ceux la coupe de Terrats, montrent des courbes unimodales dans le cas des sables fins et une distribution plurimodale dans les sables plus grossiers. Les teneurs en carbone organique sont faibles à l'exception d'un sédiment beige grisâtre qui présente une valeur assez forte (0,48 %).

Les teneurs en carbonate de ces différents calcrètes et ceux de la coupe de Terrats ont été disposées sur un graphique en fonction de leurs couleurs répertoriées dans la charte de Munsell (Fig. 8). Dix couleurs ont été retenues allant de l'ocre (2.5Y 8/6) jusqu'au bleu gris (gley1 7/1). Sur la base

de l'analyse de 23 échantillons, on aboutit à un constat identique à celui issu de l'analyse du site de Terrats : il n'y a pas de relation évidente entre la teneur en carbonate et la pigmentation de ces tuïres, des teneurs en CaCO_3 assez différentes peuvent correspondre à une même nuance de la charte. Il en ressort que la coloration a été acquise lors du dépôt en fonction des conditions d'oxydoréduction et de petites concentrations en carbone organique ; ici aussi, la teinte finale n'a été que peu modifiée par les cimentations calcitiques qui ont suivi.

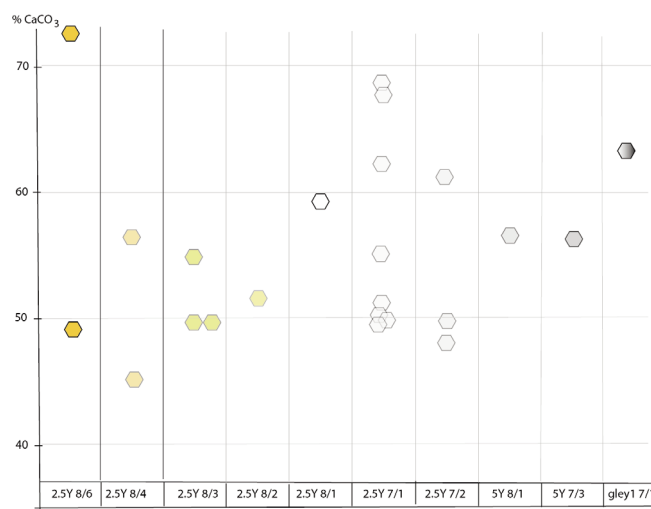


Figure 8 - Distribution des teneurs en carbonate des calcrètes en fonction des couleurs déduites du code Munsell.

Figure 8 - Distribution of the calcrete carbonate contents plotted against the Munsell soil-color index.

5.2. Microfaciès

Des petits quartz non usés ou parfois émoussés, de 100 à 200 μm de diamètre, sont fréquemment observés en même temps que des micas et des feldspaths altérés. Le ciment le plus répandu est de nature micritique, il est plus

Site	Lithologie	% sables (> 63 μ)	% CaCO_3	Dispersion	% C org
Chenal Canterrane	Calcaire beige	0,6	75,5	Mal trié	0,42
Versant Passa	Calcaire beige à tâches claires	1,9	55,3	Modérément trié	0,29
Villeneuve de la Raho	Grès fin beige à passées grisâtres	10,9	39,6	Mal trié	0,48
Villeneuve de la Raho	Grès calcaire beige ocre	13,8	46,3	Modérément trié	0,03
Villeneuve de la Raho	Grès calcaire beige ocre	2,3	48	Bien trié	0,06

Autres affleurements de tuire

Monument	Lithologie	% sable > 63 μm	% CaCO_3	Dispersion	% C org
Monastir del Camps	Calcaire beige, passées grisâtres	0,4	68,7	Modérément trié	0,53
Monastir del Camps	Calcaire beige	7,6	61,9	Mal trié	0,11
Monastir del Camps	Calcaire beige	5,1	67,3	Mal trié	0,59
Saint Vincent de Fourques	Calcaire beige	9	50,4	Mal trié	0,06
Saint Vincent de Fourques	Calcaire beige grisâtre	0,15	61,8	Modérément trié	0,29
Eglise de Nyls	Calcaire beige	4,7	51,1	Modérément trié	0,17

Tableau 3 - Données analytiques sur quelques calcrètes affleurant dans la plaine du Roussillon et de quelques calcrètes des monuments romans.

Table 3 - Analytical data for some calcretes from the Roussillon plain and of some calcretes of the Romanic monuments in that region.

ou moins pigmenté en brun ou en ocre par les oxydes de fer qui y sont associés avec des débris végétaux (cité universitaire, mas Lacassagne). La cristallisation de ce ciment se développe de manière centrifuge à l'échelle de cellules de quelques mm ou de quelques cm (mottle structure à petite échelle). Les impuretés comme les petits débris végétaux ou les oxy-hydroxydes de fer se trouvent ainsi refoulés à la périphérie (Fig. 9a, b). À Villeneuve-de-la-Raho, sur certains supports de couleur grise, moins poreux car plus argileux, l'invasion des micrites dessine une sorte de nébuleuse de très petits cristaux ($< 10 \mu\text{m}$).

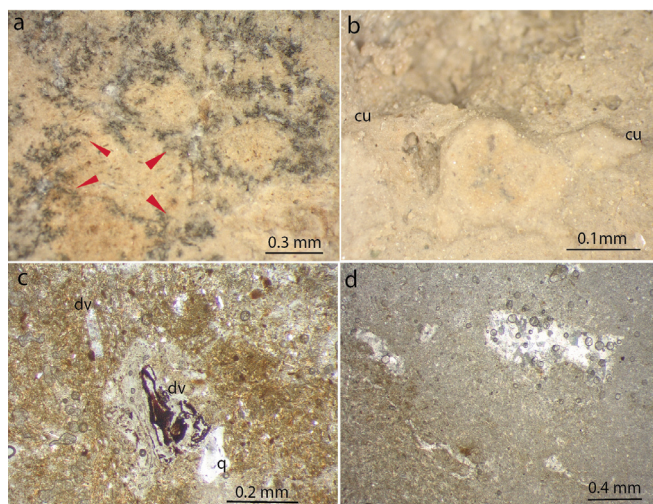


Figure 9 - Microfaciès d'affleurements de Villeneuve-de-la-Raho et du Mas Lacassagne. a - Villeneuve-de-la-Raho, surface sciée, plages ocre de cristallisation des micrites calcitiques, mouvements centrifuges (flèches rouges) repoussant les impuretés de carbone végétal. b - surface sciée, front de progression de cellules de cristallisation microsparitique et sparitique ourlées par une cutane calcitique (cu). c - Mas Lacassagne, lumière naturelle, petits débris végétaux (dv) avec tissus conservés dans les micrites brunes, quartz (q). d - lumière polarisée, cristallisations secondaires de sparites dans les cavités intra-micritiques.

Figure 9 - Microfacies from calcrete outcrops at Villeneuve-de-la-Raho and Mas Lacassagne. a - Villeneuve-de-la-Raho, sawed surface, ochre spots of micrites crystallization, centrifugal movements (red arrows) pushing away the plant carbon impurities. b - sawed surface, advancing front of cells of microsparitic and sparitic crystallization underlined by calcitic cutane (cu). c - Mas Lacassagne, natural light, small plant fragments (dv) with plant tissues preserved in brown micrite, quartz (q). d - polarized light, secondary crystallizations of sparites in intra-micritic cavities.

Les sparites se sont développées tardivement dans les fissures et les cavités demeurées encore béantes (mas Lacassagne) et constituent la principale charpente (sorte de nervure) de la cimentation carbonatée. Elles peuvent se disposer concentriquement aux mottes de micrites (Toulouse). Cette charpente de veines calcaires très dures est en léger relief à la surface de la cassure (Serrat d'en Vaquer, Nyls, Toulouse); elle est parfois assombrie par la matière organique (Serrat d'en Vaquer). On observe aussi des nodules blanchâtres de nature microsparitique qui sont ourlés par des cutanes secondaires de calcite (Serrat d'en Vaquer, Villeneuve-de-la-Raho). La cimentation sparitique s'exprime parfois le long de tiges végétales évidées que l'on trouve

surtout dans les faciès sableux (Villeneuve-de-la-Raho, Espira de l'Agly, mas Lacassagne) (Fig. 9 c, d), elle peut affecter indifféremment des masses claires ou sombres. Parfois des vides de quelques millimètres sont demeurés béants et abritent des microgêodes sparitiques.

6. QUELQUES PIERRES MONUMENTALES EN CALCRÈTE

6.1. Quelques caractères lithologiques

À Monastir del Camp, trois pierres taillées mises en réserve du monument se caractérisent par des teneurs en carbonate particulièrement élevées, tout au moins par comparaison avec les mesures de la présente étude (entre 62 % et 69 % de CaCO_3). Le sable est peu abondant ou même presque absent. Sa courbe de distribution est unimodale dans les sables fins, elle est plutôt plurimodale dans les sables moyens. Deux échantillons présentent les teneurs en carbone organique les plus élevées de l'étude (0,53 et 0,59 %). Il est à noter qu'un des échantillons présente une teinte beige grisâtre qui peut être corrélée avec la teneur élevée en matière organique, une relation rarement vérifiée à l'échelle de ces analyses (Tabl. 3).

Les deux échantillons de la Chapelle de Saint-Vincent de Fourques sont également riches en carbonate (50,4 et 61,8 %). Leur fractions sableuses sont composées surtout de sable fin modérément à mal trié, la qualité du triage étant associée à la finesse du grain. Seul un échantillon sableux se caractérise par une extrême plurimodalité (refus à 1,6, 0,5, 0,2 et 0,08 mm). Les teneurs en matière organique sont faibles, un seul échantillon est assez riche pour permettre le calcul du rapport C/N (14,5).

Enfin, le calcrète de l'église de Nyls est un calcaire beige à 51 % de CaCO_3 incluant une faible fraction sableuse composée d'un sable fin modérément trié à distribution unimodale (refus à 0,125 mm). Le carbone organique n'y figure qu'à l'état de traces. À Trouillas, le Mas Déu voisin, château fortifié édifié par les Templiers, a fait aussi un très large emploi de ces mêmes calcrètes beige à gris beige, notamment dans les parements de son église.

Les églises romanes de Saint-André, de Saint-Génis-des-Fontaines, Sorède et de Llupia, toutes logées au pied des Albères, montrent un usage récurrent à la base de leurs principales murailles de grandes pierres en calcrètes gris bleuté (tuire nègre) significatives de la proximité d'affleurements. Ces mêmes églises peuvent aussi renfermer des grès gris bleuâtre qu'il ne faut pas confondre avec les tuïres, il s'agit d'un grès assez grossier à ciment siliceux d'âge miocène, faciès latéral des grès du Boulou, plus connus pour leur teinte habituellement rougeâtre ou grise et qui furent largement employés dans l'architecture du palais des rois de Majorque (Giresse *et al.*, 2014). Ici, ces grès bleus tendent à être logiquement plus abondants en s'approchant du Boulou

et de ses carrières (églises de Saint-Génis-des-Fontaines, Saint-Étienne-de-Nidolères et d'autres).

6.2. Commentaires

Plusieurs des pierres analysées notamment au Monastir del Camp montrent des cimentations carbonatées exceptionnellement denses qui n'ont pas été retrouvées dans la plupart des affleurements voisins, ni au sein des autres monuments, à l'exception notable des églises de Lluïa et de Pontella. La relation de la pigmentation grisâtre de ces pierres avec la concentration en matière organique ne s'est trouvée vérifiée que dans un seul cas. Les fractions insolubles sont généralement pauvres en sable, c'est alors un sable à la fois très fin et modérément trié.

Les calcrètes des pierres monumentales de Saint-Vincent de Fourques montrent des teneurs en carbonate assez élevées, elles aussi, bien que moindres de celles de Monastir del Camp. Les autres paramètres des pierres monumentales de cette chapelle sont comparables à ceux des affleurements voisins, le sable étant mieux trié lorsqu'il est très fin. Il est à noter que l'échantillon qui renferme 0,43 % de carbone organique montre une pigmentation partiellement grisâtre.

Enfin, le calcrète de l'église de Nyls est un calcaire beige à sable très fin modérément trié et à matière organique peu abondante et assez dégradée, caractères que l'on retrouve dans beaucoup d'autres pierres en calcrète des ruines templières du Mas Déu et de l'église de Pontella.

Les autres affleurements de calcrètes de Villeneuve-de-la-Raho et de Passa présentent des teneurs en carbonate et des caractères texturaux qui entrent dans la gamme de ceux analysés dans la coupe de Terrats. Le gros bloc de calcrète qui a glissé jusque dans le lit de la Canterrane avec son exceptionnelle teneur en CaCO_3 en fait potentiellement une excellente pierre de taille pour les monuments.

En règle générale, les échantillons de pierres de monuments anciens présentent des qualités texturales plutôt comparables à celles rencontrées dans les dépôts à l'affleurement. Parfois leurs fortes cimentations et recristallisations en font des matériaux de construction d'une excellente qualité. Toutefois, les teneurs très élevées en carbonate de certaines pierres de la chapelle de Saint-Vincent de Fourques et surtout du Monastir del Camp n'entrent qu'imparfaitement dans les gammes tirées des analyses des affleurements. Il s'avère donc que nous ne connaissons pas encore tous les sites précis où ces calcrètes ont pu être prélevés.

7. BILAN DES ETAPES D'ACCUMULATION DU CALCRÈTE ET COMMENTAIRES

7.1. L'environnement physique de la sédimentation

La coupe référence de 12 m de la Canterrane, près de Terrats, nous a permis de distinguer trois épisodes de crues principales représentés par des unités sablo-graveleuses interrompues par des intervalles de dépôts de sables fins ou de limons. La majorité des sables des alluvions sont mal classés avec des courbes de distributions plurimodales, seuls quelques sables fins ou limons font exception en présentant un triage modéré. Chaque unité n'excède pas un mètre d'épaisseur, l'extension latérale pouvant atteindre une centaine de mètres, rarement davantage. Les strates de dépôts fins sont souvent caractérisées par des structures en motte.

Les dépôts fins, plus silteux qu'argileux, correspondent aux interfloes mouvants de drains faiblement incisés dans la plaine de colmatage. Leur régime alluvionnaire fût sous le contrôle d'un climat sub-aride à saisons contrastées. L'accumulation se développait dans un bassin qui est déjà en grande partie colmaté, la réduction de l'espace d'accommodation put alors conduire à quelques débordements au delà des limites habituelles de la dépression alluviale. Ces processus impliquent que vers 4 Ma les manifestations structurales de l'effondrement du bassin étaient de plus en plus atténuées conduisant à une aggradation assez lente de la plaine alluviale, du moins dans les secteurs isolés des principaux chenaux (Laumonier *et al.*, 2015). Les cimentations des calcrètes concernent le plus souvent les sables fins, c'est à dire correspondent à des intervalles de diminution de l'apport clastique et d'affaiblissement de cette aggradation. Dès lors, ce contexte laisse peu de possibilités d'extension palustre de vastes marécages pérennes où se déposeraient des grands corps sédimentaires calcaires à l'égal de ceux de l'Éocène pyrénéen (Nickel, 1982) ou du Miocène du bassin de Madrid (Sanz *et al.*, 1995).

7.2. Les processus pédogénétiques au sens large

Les calcrètes n'entrent pas dans la codification des sols où l'horizon le plus carbonaté est désigné sous le nom d'horizon K (Gile *et al.*, 1966). Communément, ils peuvent être associés aux accumulations quaternaires ou récentes des vertisols ou des arisols des régions à climat très fortement aride comme ceux du sud de l'Italie, de l'Andalousie et plus encore du Maroc (Ruellan, 1973 ; Camicelli *et al.*, 1989 ; Wright et Tuckert, 1991). Mais il s'agit alors de processus continus de nature pédogénétique en conditions d'émersion qui sont distincts de ceux d'abord hydromorphes (gleys), puis hydrogéologiques (diagenèse carbonatée précoce) que nous avons suggéré pour les calcrètes pliocènes du Roussillon. Ces derniers sont habituellement de couleur beige clair,

parfois ocres, mais montrent aussi des teintes grisâtres qui témoignent d'épisodes anoxiques définis pendant la pédogenèse hydromorphe avec des sols marécageux s'apparentant à des gleys. Cette pigmentation grisâtre est souvent liée à des teneurs légèrement plus fortes en matière organique, sans que la relation puisse être systématisée.

On reconnaît un horizon de gley à la prééminence de pigmentations grisâtres ou verdâtres qui résultent de l'immersion pérenne sous une tranche d'eau, c'est à dire d'une élévation persistante du toit de la nappe phréatique (Mack et al., 1993) ; il s'agit donc d'un sol hydromorphe. Le toit élevé, mais fluctuant de la nappe phréatique contrôle l'alternance de conditions oxydantes et réductrices qui aboutissent à une structure en mottes de forme irrégulière et de couleur variable (rougeâtre, marron ou jaune) dans une matrice grisâtre. Le piégeage ou la remobilisation du fer intervenant lors des changements de Eh. Ces mottes se distinguent en fonction de concentrations localisées des oxydes de fer et de manganèse en conditions proches de l'émersion. Ces structures en mottes se trouvent communément dans les gleys insuffisamment drainés, c'est à dire les pseudo-gleys, les limites de ces mottes sont soulignées par des fissurations au début de la dessiccation (Pi-Pujol and Buurman, 1997 pour le Paléogène de l'Ebre; Alonzo-Zarza, 2003 pour le Miocène de Teruel). Nous avons pu observer à Terrats que ces processus pédogénétiques sont aussi associés à des structures verticales assez grossières qui résultent probablement à la fois de la perforation des racines et de l'activité des organismes fouisseurs (poissons se protégeant de l'émersion). La rareté ou l'absence de véritables figures de dessiccations nous situerait davantage dans la définition de véritables sols hydromorphes. On peut envisager un environnement humide persistant, mais astreint aussi à des tendances émerives assez avancées selon le modèle déjà bien décrit par Tanner (2003) dans les aridifications de la fin du Trias du Nouveau Mexique. La prévalence de la montmorillonite dans les argiles va dans le sens d'un environnement subtropical que Bourcart (1945) assimilait à celui du Bas-Niger. En milieu palustre, les accumulations pédogénétiques et diagénétiques se succèdent et sont difficiles à séparer car elles expriment un processus post-sédimentaire plus ou moins continu.

7.3. Les processus diagénétiques de la cimentation carbonatée

Les calcrètes (que l'on peut parfois aussi appeler caliches) sont des lits sédimentaires de texture variée (du silt aux graviers) qui ont été cimentés le plus souvent par de la calcite. Le processus implique la présence de particules qui servent de support à la précipitation, de ce fait, il se distingue ainsi nettement des calcaires de précipitation lacustres constitués à partir des eaux « libres » du lac. Ces lits indurés (hardpan) constituent des croûtes calcaires susceptibles de résister à l'érosion et de se fossiliser. Ces processus sont aujourd'hui observés dans plusieurs régions arides ou semi-arides du

monde : Australie centrale et occidentale (Butt et al., 1977 ; Chen et al., 2002), Kalahari (Nash et McLaren, 2003), hautes plaines de l'ouest des Etats-Unis (Mack et al., 1993), déserts du Sonora et de l'est de l'Arabie saoudite (Gile et al., 1966).

On peut généralement admettre deux processus d'alimentation en calcium qui ne sont pas forcément exclusifs l'un de l'autre :

- l'hydrolyse des horizons superficiels (horizons A) des sols, notamment de la calcite et des feldspaths, alimente l'horizon B au sommet de la nappe phréatique où la précipitation des cations solubles intervient au fur et à mesure de l'évaporation, c'est le processus phréatique ;
- les eaux de pluie saturées en CO₂ sont relativement acides vis-à-vis des carbonates du soubassement qu'elles dissolvent dans un premier temps avant de précipiter dans un second, c'est le processus vadose.

On reconnaît souvent qu'il existe un continuum entre ces différents processus qui peuvent aboutir à des structures de calcrètes assez semblables, ce qui pose le problème de leur différenciation.

Le concrétionnement du calcrète, le colmatage sparitique de ses cavités, son épaississement et sa profondeur suggèrent une pérennité des conditions saisonnières de semi-aridité accompagnées éventuellement d'un ralentissement du rythme de la sédimentation.

L'accumulation des calcrètes implique une source d'approvisionnement en calcium, c'est à dire un environnement proche riche en roches carbonatées ou calciques. La plaine du Roussillon est bordée au nord par les Corbières où prédominent les terrains calcaires jurassiques et surtout crétacés. Ces mêmes terrains sont bien représentés sur les versants de la vallée de l'Agly, voire sur ceux de la Têt alors que les formations calcaires dévonienues affleurent sur les collines des Aspres. Dans ce dernier cas, les eaux de la Canterrane descendent directement du causse de Thuir-Castelnou et des petits massifs calcaires de Montauriol et de Llauro. Mais ce sont vraisemblablement les accumulations immédiatement sous-jacentes du Miocène et du Pliocène inférieur riches elles même en carbonate et en feldspaths plagioclases qui ont été les plus à même de constituer les sources principales.

En Roussillon, les calcrètes se présentent essentiellement sous forme de bancs plus ou moins fortement indurés, les premières étapes poudreuses ou nodulaires ne sont qu'assez rarement observées, peut-être parce que trop labiles pour être conservées. Les nappes d'eau peu profondes ou les nappes phréatiques de surface requièrent des fonds de dépression, mais aussi des zones de débordement de crues en limite de bassin où des eaux viennent s'emprisonner pour subir une évaporation complète comme dans le cas des carbonates onlap du Paléocène du sud de la France, des teneurs de 40 à 50 % de CaCO₃ sont alors généralement attendues (Wright et Tuckert, 1991). Nous avons vu qu'en Roussillon, ces

teneurs peuvent atteindre ou dépasser 60, voire localement 70 %. Il est parfois noté que le concrétionnement peut-être graduel à la base et plus généralisé vers le sommet (Wright et Tuckert, 1991), mais c'est un caractère que nous n'avons pas observé dans les calcrètes roussillonnais.

S'il est admis que l'épaisseur des bancs de calcrètes peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres (Butt *et al.*, 1977), en Roussillon, elle sera restreinte à quelques dizaines de centimètres et n'atteindra que rarement un ou deux mètres, l'extension latérale pouvant approcher une centaine de mètres. La fabrique interne du tuïre ne montre pas les nodules coalescents, ni les recimentations bréchiques de roches anciennes d'origine plutôt lacustres. Par contre, elle peut présenter des clastes siliceux flottants.

Les processus de formation des calcrètes du Roussillon sont donc distincts de ceux des autres calcaires continentaux comme les tufs, les travertins ou les calcaires fluviaux.

7. 4. La pierre monumentale, applications

Au XIX^e siècle, les bancs de calcrètes ont été largement employés dans le Sud de l'Australie pour la construction des bâtiments bien que ce calcaire, souvent trop impur, ait été souvent choisi par défaut, étant généralement réservé aux usages grossiers du ballast des routes.

Dans le Roussillon, les calcrètes peuvent présenter une porosité apparente assez forte et des teneurs en CaCO_3 très variables (40 à 70 %). Il en résulte des qualités assez contrastées de matériaux dont on peut supposer qu'ils furent l'objet d'estimations opportunistes, mais très empiriques par les premiers bâtisseurs de l'époque romane ou encore de l'Antiquité tardive.

Les pierres en calcrète, même celles de dimension métrique qu'on trouve à la base de monuments imposants comme la cathédrale d'Elne, ne montrent pas de fissurations ou de plans de rupture qui auraient pu être déterminés par des contraintes ou par une charge surincombante trop sévère. Malgré une porosité variable, ces pierres ne présentent généralement pas les figures d'une dégradation superficielle trop sévère, en tous cas, elles ne se distinguent pas spécialement de ce point de vue des autres roches calcaires de l'architecture. Tout au plus, dans certains monuments comme l'église templière du Mas Déu, peut-on noter un début de lessivage notamment quand une phase argileuse participe à la composition de la roche, ce qui est assez rare d'après nos analyses. Cette bonne tenue est liée au fait que la majorité des pierres est fortement cimentée par la succession de précipitations micritiques dans un premier temps, puis sparitiques dans un deuxième. Les calcrètes analysés issus des monuments renferment entre 50 et 70 % de CaCO_3 . Sur ces bases, ils offrent une bonne aptitude à la construction. Toutefois, une dégradation assez manifeste concerne les sculptures des chapiteaux ou des colonnes des

églises romanes de Canohès, de Villeneuve-de-la-Raho, de Sainte-Marie-des-Albères qui sont pourtant à l'abri des intempéries. Dans ces cas, l'altération a été induite, voire aggravée par des enduits de plâtre qui, par humidité capillaire, alimentent des solutés légèrement acides, des réparations à base de mortier de tuileau ont été ainsi réalisées à Sainte-Marie-des-Albères.

L'usage en remploi vraisemblablement opportuniste de parements sculptés en tuïre pour la confection d'un four tardo-antique, près de Thuir, illustre les propriétés d'une pierre éventuellement réfractaire permettant une application à la fabrication des céramiques. Toutefois, la présence d'une composante siliceuse beaucoup trop abondante (30 à 50 %) a sans doute interdit tout usage comme pierre à chaux.

Il faut bien convenir que l'apparence des calcrètes du Roussillon n'est pas très esthétique. Il s'agit d'une pierre souvent grisâtre avec des salissures d'ocre rouille, assez terne car, de par sa cimentation largement micritique, elle prend plutôt mal la lumière. Cependant dans quelques cas, comme notamment les pierres du Monastir del Camp, voire celles des églises de Nyls, de Lluçia ou du Mas Déu, il peut s'agir d'un calcaire clair presque blanc qu'on pourrait confondre avec le calcaire lacustre de Sigean, pierre noble de prestige du palais gothique des rois de Majorque à Perpignan (Giresse *et al.*, 2004). De fait, dans les architectures internes et peut-être externes de nombre de monuments romans, l'usage courant était de recouvrir d'enduits de plâtre ou de peintures les parois des édifices, ce qui affranchissait le bâtisseur de toute préoccupation de l'apparence.

Les bancs de calcrètes à l'affleurement dans les berges érodées montrent des extensions latérales réduites souvent à quelques dizaines de mètres, ce qui limiterait voire interdirait les possibilités de véritables exploitations en carrières à ciel ouvert. Pour l'instant, nous n'avons découvert aucun témoin de l'existence de telles carrières qui impliqueraient de vastes travaux de décapage de surface. Par contre, l'incision des rivières, le recul des falaises des berges libèrent de nombreux blocs de calcrètes qui s'effondrent sur le lit offrant souvent en 2d, sinon en 3d, des dimensions proches de celles requises pour la construction des monuments ou propices à un premier travail assez simple d'équarrissage avant transport. De ce point de vue, la connexion immédiate entre les blocs tombés dans le lit de la Canterrane et les pierres de la tour de l'église fortifiée voisine de Terrats paraît convaincante. Le toponyme canterrane correspond au canterana des langues espagnoles et catalanes qui désigne le lieu où on extrait des roches à usage industriel, c'est à dire des carrières. Un des petits affluents de la Canterrane à Fourques, se nomme la Calcerana, c'est à dire pierre de calc ou de chaux, ce qui ne laisse pas de doute sur l'exploitation des calcrètes dans le secteur. On peut imaginer des ateliers plus ou moins itinérants de taille grossière, sinon de sculpture qui ont jalonné le lit presque toujours à sec de la Canterrane, voire de celui du Réart, la finition de la taille et l'ajustement étant réservés après transport au chantier du monument. De ce point de vue, les

constructions de l'église et des tours du château templier du Mas Déu ont dû nécessiter des chantiers actifs et importants très probablement implantés à proximité dans le lit de cette rivière.

Une prospection plus systématique des lits de rivières devrait ainsi pouvoir multiplier les exemples probants de relation entre les sources et les emplois de cette pierre monumentale.

Bassin versant	N°	Communes	Nature du monument	Datation	Armature du bâti	Paréments en remploi
Tech	1	Argelès-sur-Mer	N-D du Château (Ultrera)	X ^e -XII ^e	Arc triomphal	
Réart-Canterrane	2	Bages	Egl. Saint-André	XI ^e - XIV ^e	Angle nef	
Tét	3	Baho	Egl. Saint-Vincent	XII ^e remanié		Paréments
Réart-Canterrane	4	Banyuls-dels-Aspres	Egl. Saint-André	XII ? XV ^e remanié		Paréments chevet
Réart-Canterrane	5	Brouilla	Egl. Sainte-Marie	XII ^e		Paréments chevet
Tét	6	Canet-en-Roussillon	Chap. Saint-Martin (Château)	XI- XIII ^e		Paréments chevet
Réart-Canterrane	7	Canohès	Egl. Saint-Cyr et Sainte-Julitte	XI-XII ^e	Intérieur de la nef, chapiteaux	
Réart-Canterrane	8	Corneilla-del-Vercol	Egl. Saint-Christophe	XII ^e rem. XIX ^e		Paréments
Tech	9	Elne	Cathédrale Sainte-Eulalie et Sainte-Julie	XI et XIV ^e	Lésènes abside	
Tech	10	Elne	Egl. Sainte-Eugénie de Tresmales	XI ^e		Paréments
Agly	11	Espira-de-l'Agly	Rempart ouest du prieuré	XI ^e		Paréments
Réart-Canterrane	12	Fourques	Egl. Saint-Martin	XIII ^e rem. XVIII ^e	Angle nef et baie ancienne	
Réart-Canterrane	13	Fourques Tapia	Chapelle Saint-Vincent	X ^e	Éléments porteurs et baies	
Tech	14	Latour-Bas-Elne	Egl. Saint-Jacques	X refaite au XVII ^e		Parément abside
Réart-Canterrane	15	Liupia	Egl. Saint-Thomas	XI ^e rem. XIV ^e		Paréments façade
Réart-Canterrane	16	Liupia (Mas St-Sauveur)	Egl. Sainte-Marie de Vilamila	XI ^e	Tous les murs et les colonnes du portail	
Réart-Canterrane	17	Montauriol	Egl. Saint-Saturnin	X-XII ^e		Parément
Tét	18	Néfiach	Egl. Sainte-Marie de l'Assomption	Rem. XVIII-XIX ^e		Paréments chevet
Tech	19	Ortaffa	Egl. Sainte-Eugénie	XII ^e mod. XVI	Angle de la nef	
Tech	20	Palau-del Vidre	Egl. Sainte-Marie	XII ^e - rem. XVIII		Paréments façade
Réart-Canterrane	21	Passa	Egl. Saint-Pierre	XII ^e rem. XV ^e		Paréments
Réart-Canterrane	22	Passa	Portail des fortifications	XIV ^e ?		Paréments
Réart-Canterrane	23	Passa	Egl. Sainte-Marie du Monestir del Camp	XI ^e -XII ^e	Base de la nef	
Tét	24	Perpignan	Egl. Saint-Jean le Vieux	XI ^e -XIII ^e		Paréments abside
Tét	25	Perpignan Vernet	Egl. Saint-Christophe	IX ^e -XI ^e		Parément base abside
Tét	26	Perpignan Ruscino	Egl. Sainte-Marie et Saint-Pierre	XI ^e -XIII ^e		Parément base abside
Tét	27	Pézilla-la-Rivière	Egl. Saint-Saturnin	X-XI ^e	Arcs doubleaux int. et extérieurs	
Réart-Canterrane	28	Pollestres	Egl. Saint-Marin	X-Rem. XV ^e		Paréments nef
Réart-Canterrane	29	Pollestres	Portail des fortifications	XIV ^e		Paréments
Réart-Canterrane	30	Ponteilla	Egl. Saint-Étienne	XII ^e rem. XIII ^e	baie abside	
Réart-Canterrane	31	Ponteilla	Murs de la Cellera	XIIe-XIV ^e		Paréments
Réart-Canterrane	32	Ponteilla Nyls	Egl. Saint-André	XII ^e	Nef portail et baies	
Tech	33	Saint-André	Egl. Saint-André	IX-XIII ^e		Paréments nef
Tech	34	Saint-Cyprien	Egl. Saint-Cyprien	XIII s. Rem. XVIII ^e		Paréments nef
Tech	35	Saint-Cyprien	Egl. Saint-Étienne de Vilarsa	Xe -XII ^e Rem. XIX ^e		Paréments
Tét	36	Saint-Félicien d'Amont	Egl. Sainte-Marie	XIe-XII ^e	tympant ?	Paréments mur ouest
Tech	37	Saint-Génis-des-Fontaines	Egl. Saint-Michel	XI ^e	Baie abside	
Tech	38	Saint-Génis-des-Fontaines	Maison attenante au cloître		Blason sur arc médiéval	
Réart-Canterrane	39	Saint-Jean-Lasseille	Egl. Saint-Jean l'Évangéliste	X-Rem. XVII ^e		Parément nef
Réart-Canterrane	40	Saleilles	Egl. Saint-Étienne	X ^e -XI ^e		Parément nef
Réart-Canterrane	41	Terrats	Egl. Saint-Julien et Sainte-Basile	XI ^e -XIV ^e		Paréments abside
Réart-Canterrane	42	Thésa	Egl. Saint-Pierre en ruines	IX ^e -XII ^e	Arcs de la nef	
Tét-Basse	43	Thuir	Site antique de Els Vidrers	Antérieur au IV ^e siècle		Cippes sculptées
Tét-Basse	44	Thuir	Egl. N-D de la Victoire, ex. St-Pierre	XII ^e rebâtie au XVIII ^e		Paréments nef
Réart-Canterrane	45	Tordères	Egl. Saint-Nazaire et Saint-Celse, ex. St-Martin	X ^e rem. XVI ^e et XIX ^e		Paréments nef
Tét-Basse	46	Toulouges	Egl. Sainte-Marie de l'Assomption	XI-XIII ^e		Paréments abside
Réart-Canterrane	47	Tresserre	Egl. Saint-Saturnin	XII ^e Rem. XVIII ^e		Paréments nef
Réart-Canterrane	48	Trouillas	Egl. Saint-Assise et Sainte-Victoire	XIII ^e Rem. XVII ^e		Chapelles Façade
Réart-Canterrane	49	Trouillas	Porte des remparts	XIIe et XV ^e	El. porteurs	
Réart-Canterrane	50	Trouillas Masdéu	Egl. Sainte-Marie Fortifications templières	XII ^e s.	Tous les éléments porteurs	
Réart-Canterrane	51	Villemolaque	Egl. Saint-Julien et Sainte-Basile	XIII ^e Rem. au XIX ^e	Arcatures internes	Paréments nef
Réart-Canterrane	52	Villeneuve-de-la-Raho	Egl. Saint-Julien et Sainte-Basile	X-XII ^e	Corniche, Chapiteaux	

Tableau 4 - Recensement de l'usage totalement méconnu du calcrète (tuïre) dans une cinquantaine de monuments anciens dans le Roussillon.

Table 4 - Inventory of the previously unrevealed use of the calcrete (tuïre) in about fifty historic monuments from Roussillon.

Nous avons rassemblé les exemples d'emploi du calcrète (tuïre), matériau qui n'avait jamais été signalé dans l'architecture du Roussillon (Tabl. 4, Fig. 1). Il s'agit d'abord de petits monuments funéraires de l'Antiquité latine (cippes) trouvés en remploi dans des fours datés du IV^e siècle à Thuir (n° 43) (Fig. 10), mais aussi de quelques fortifications médiévales (n° 11, 22, 29, 31 et 49), dont celle de la commanderie des Templiers (n° 20). Alors que ce matériau est rarement employé dans l'architecture civile (n° 38), il est attesté dans le bâti de 45 églises. En réalité, la plupart des églises préromanes (n° 12) et romanes qui sont bien conservées dans la plaine, surtout dans le bassin du Réart-Canterrane, sont armées par du tuïre pour les éléments porteurs et en sont également habillées dans les parties les plus nobles, y compris pour la sculpture. Cela représente à ce jour une vingtaine de monuments (Fig. 1, Fig. 11, 12, 13, 14). Les nombreuses églises remaniées à l'époque moderne, surtout à partir du XVIII^e siècle, conservent souvent une mémoire de l'emploi de cette roche dans leurs murs. Mais l'on note aussi, dès le XI^e siècle, le remploi de blocs de tuïres dans les parties les plus exposées à la vue et les plus sacrées de certaines églises. C'est le cas pour la cathédrale d'Elne (n° 9), bâtie en granite, mais où le tuïre est exposé sur les lésènes de l'abside (Fig. 14), tout comme il est exposé de part et d'autre de l'arc triomphal dans l'église castrale du château d'Ultrera (n° 1), édifiée au sommet des Albères, dans un environnement fait de roches paléozoïques, de gneiss en

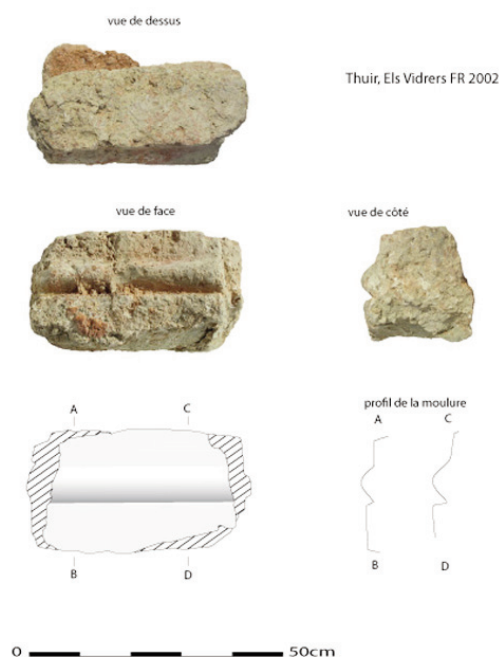


Figure 10 - Site antique de Els Vidrers (Thuir - 66). Bloc mouluré en tuïre trouvé en remploi dans la structure d'un four de l'Antiquité tardive avec d'autres éléments de même nature (calcrète) provenant de cippes funéraires romaines antérieures au IV^e siècle de notre ère (Fouilles Éric Da Costa, Inrap Méditerranée ; DAO Cécile Respaut).

Figure 10 - Antique site from Els Vidrers (Thuir - 66). Block of tuïre decorated with mouldings found in re-use in the structure of an oven from the late Antiquity with other pieces of the same matter coming from funeral Roman cippes older than IVth century (archaeological excavations of Eric Da Costa, Inrap Méditerranée; DAO Cécile Respaut).

particulier. En l'absence totale de monuments wisigothiques ou carolingiens, il est difficile d'affirmer que les églises du premier art roman réutilisent des matériaux d'églises paléochrétiennes antérieures pour en rappeler le souvenir, mais de nombreux exemples de cette exposition du tuïre dans les monuments du XI^e et XII^e siècles qui ont été bâtis en matériaux différents, tendraient à fortement le suggérer.



Figure 11 - Église Saint-Vincent (Fourques - 66), sise au lieu-dit Tàpies, ancien village médiéval disparu, proche de Passa. Vue de l'architecture intérieure de la petite église préromane du Xe siècle (mire : 1 m). L'arc du chevet trapézoïdal voûté est armé de blocs parementés de tuïre (points rouges), certains ayant disparu sur le montant de droite qui est sommairement réparé avec des briques. Par contre, les parements sommitaux de l'arc outrepassé sont réalisés en travertin, roche également résistante à la compression, mais bien plus légère (points verts). Il en est de même pour la porte d'entrée située au sud (© Cécile Respaut).

Figure 11 - Saint-Vincent Church (Fourques - 66), located at the place called Tàpies, now disappeared medieval village, close to Passa. View of the interior of the small pre-Romanic church of the Xth century (rule for measurement: 1 m). The bow of the arched bedhead is armed with blocks made in tuïre (red points), some having disappeared on the right amount which is boorishly repaired with bricks. On the other hand, upper facings of the horseshoe arch (Moorish arch) are realized in travertines, also resistant rocks in the compression but lighter (green points). It's the same for the front door in the South (© Cécile Respaut).



Figure 12 - Église romane Sainte-Marie de Nyls (Ponteilla - 66). Dominant la Canterrane et aujourd'hui en ruine, elle est largement bâtie avec le matériau local (tuïres pliocènes, galets de quartz patinés et éolisés). Déjà citée au X^e siècle, elle fut agrandie au XII^e siècle par les Templiers. Sur la vue d'une baie typique réalisée en tuïre, on remarquera la bonne résistance du bloc de « tuïre blanc » (à droite, échelle en cm) et l'érosion qui affecte d'autres blocs, plus sombres (© Cécile Respaut).

Figure 12 - Sainte-Marie de Nyls Romanic church (Ponteilla - 66). Above the Canterrane River and today in ruins, it is largely built with local materials (Pliocene tuïres, pebbles of quartz varnished and sculptured by the wind). Already quoted in the Xth century, it was enlarged in the XIIth century by the Knight Templars. On the view of a typical window opening build with tuïre, we notice the good resistance (to the right, scale in cm) and the erosion affecting other darker blocks (© Cécile Respaut).

REMERCIEMENTS

Ce travail entre dans le cadre du Programme Collectif de Recherches (PCR) « Identification et localisation des roches et des carrières utilisées dans la construction en Roussillon au Moyen-Âge » de la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC) qui le finance partiellement. Ce projet, appelé PETRUS, bénéficie, par ailleurs, d'une coopération régulière avec les chercheurs de l'INRAP des Pyrénées-Orientales ainsi qu'avec ceux du Pôle archéologique départemental.

Les prélèvements de Terrats en descente « en rappel » sur la falaise de la Canterrane ont été réalisés par Olivier Raynal, ingénieur de recherches au CEFREM.

Les photos des pièces d'architecture en tuïre sont dues à Cécile Respaut de l'INRAP Perpignan.

Ce texte a été relu par David Dessandier et Denis Thiéblemont, que nous remercions pour le soin apporté aux dernières corrections dont a bénéficié cette publication.



Figure 13 - Chapiteaux du début du XIIe siècle réalisés en tuïre. À gauche dans l'abside de l'église Saint-Cyr et Sainte-Julitte de Canohes (66) ; à droite sur l'arc triomphal de l'église romane Saint-Julien et Sainte-Basilisse de Villeneuve-de-la-Raho (66). Dans les deux cas, les sculptures ont beaucoup souffert d'un épais enduit de plâtre qui les a longtemps recouverts (© Caroline de Barrau).

Figure 13 - Capitals of the beginning of the XIIth century realized with tuïre. To the left, in the apse of the Saint-Cyr and Sainte-Julitte church of Canohes (66), to the right, on the triumphant arch of the Saint-Julien and Sainte Basilisse Romanic church of Villeneuve de la Raho (66). In both case, sculptures suffered a lot from a thick filler of plaster which covered them for a long time (© Caroline de Barrau).



Figure 14 - Cathédrale Sainte-Julie et Sainte-Eulalie (Elne - 66). Sur la vue de l'abside édifiée au XI^e siècle, apparaissent quelques blocs de tuïre sur toutes les lesènes en granit. Placées bien en vue à un mètre du sol, cette roche occupe ici une position anormale dans le bâti, très probablement pour rappeler le matériau qui formait l'essentiel des parties ouvragées de l'église antérieure. De nombreux autres exemples peuvent être cités en Roussillon de tuïres massivement utilisés dans les églises primitives dont on retrouve quelques exemplaires bien exposés dans les absides rénovées aux XI^e et XII^e siècles pour témoigner d'une continuité du lieu sacré (© Cécile Respaut).

Figure 14 - Cathedral Sainte-Julie and Sainte Eulalie (Elne - 66). View of the apse built during the XIth century with some blocks in tuïre on all the lesenes in granite. Placed very in sight one meter above the ground, this rock occupies here an abnormal position in the construction, very probably to call back the memory of the material which formed the main part of the previous church. Numerous examples can be quoted in Roussillon of tuïres massively used in the primitive churches some copies of which we find exposed well in the renovated apses in XIth and XIIth centuries to testify of a continuity of the sacred place (© Cécile Respaut).

BIBLIOGRAPHIE

- Aguilar J.-P., Calvet M., Michaux J.** (1986) - Description des rongeurs pliocènes de la faune du Mont Hélène (Pyrénées-Orientales, France), nouveau jalon entre les faunes de Perpignan (Serrat d'en Vaquer) et de Sète. *Palaeovertebrata*, Montpellier, 16, p. 127-144.
- Aguilar J.-P., Michaux J., Bachelet B., Calvet M., Faillat J.-P.** (1991) - Les nouvelles faunes de rongeurs proches de la limite mio-pliocène en Roussillon, implications biostratigraphiques et biogéographiques. *Palaeovertebrata*, Montpellier, 20, p. 147-174.
- Alonso-Zarza A.M.** (2003) - Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth Science Review*, 60, 3-4, p. 261-298.
- Berger G.M., Fontelles M., Leblanc D., Clauzon G., Marchal J.P., Vautrelle C.** (1993) - *Notice explicative de la feuille Rivesaltes à 1/50 000*. Carte géologique de la France (1901), Service géologique national, BRGM, Orléans, 119 p.
- Bourcart J.** (1945) - Étude des sédiments pliocènes et quaternaires du Roussillon. *Bulletin Service Carte géologique de France*, XLV, 218, p. 395-476.
- Butt C.R.M., Horwitz R.C., Mann A.W.** (1977) - Uranium occurrences in calcrete and associated sediments in Western Australia. CSIRO, Division of Mineralogy, Report, FP16.
- Chen X.Y., Litern M.J., Roach I.C.** (2002) - *Calcrete: characteristics, distribution environments and mineral exploration*. Coopérative Research Center for Landscape environment and mineral exploration, Camberra, Australia, 160 p.
- Calvet M.** (1986) - La stratigraphie du Néogène du Roussillon et le problème des séries détritiques de bordure. Essai de mise au point. *Géologie de la France*, p. 205-220.
- Calvet M.** (1999) - Régime des contraintes et des volumes de relief dans l'est des Pyrénées. *Géomorphologie : relief, processus, environnements*, 5, 5-3, p. 253-278.
- Carnicelli S., Ferrari G.A., Magaldi D.** (1989) - Les accumulations carbonatées de type « calcrete » dans les sols et formations superficielles d'Italie méridionale. In: Carbonates continentaux et paléoenvironnements dans le domaine méditerranéen. *Méditerranée*, 3, 68, p. 51-59.
- Depéret C.** (1885) - Description des vertébrés fossiles du terrain pliocène du Roussillon. Thèse, Paris. *Annales Société Géologique*, 17, p. 137-268.
- Depéret C., Donnezan A.** (1890) - Les animaux pléistocènes du Roussillon. *Mémoire Société Géologique de France*, Paléontologie, 3, 194 p.
- Duvail C., Gorini C., Lofi J., Le Strat J.-P., Clauzon G., Tadeu dos Reis A.** (2005) - Correlation between onshore and offshore Pliocene-Quaternary systems tracts below the Roussillon Basin (eastern Pyrenees, France), *Marine and Petroleum Geology*, 22, 6-7, p. 747-756.
- Folk I., Ward W.C.** (1957) - Brazos river bar: a study of significance of grain size parameter. *Journal Sedimentary Petrology*, 27, p. 3-26.
- Gile L.H., Peterson F.F., Grossman R.B.** (1966) - Morphological and genetic sequences of accumulation in desert soils. *Soil Science*, 100, p. 347-360.
- Giresse P., Martzluff M., Catafau A.** (2014) - Les pierres et les matériaux de construction du Palais des rois de Majorque. Les sources géologiques et leur choix. In: Passarius O., Catafau A. (dir.). *Un palais dans la ville*. Vol. 1 : *Le Palais des rois de Majorque à Perpignan*, Collection Archéologie Départementale n° 3, Pôle Archéologique Départemental, éd. Trabucayre, p. 211-247
- Gottis M.** (1958) - L'apport des travaux de la Compagnie d'exploitation pétrolière (CEP) dans la connaissance du bassin tertiaire du Roussillon. *Bulletin Société Géologique de France*, 43, p. 739-747.
- Laumonier B., Calvet M., Barbey P., Guennoc P., Lambert J., Lenoble J.-L., Wiazemski M.** avec la collaboration de **Autran A., Cocherie A., Rossi P.** (2015) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Argelès-sur-Mer – Cerdagne (1097). Orléans : BRGM, 149 p. Carte géologique par Calvet M., Autran A., Wiazemski M., Laumonier B., Guitard G. (2015).
- Mack G.H., James W.C., Monger H.C.** (1993) - Classification of paleosols. *Geological Society of America Bulletin*, 105, p. 129-136.
- Magné J.** (1978) - Études microstratigraphiques sur le Néogène de la Méditerranée nord-occidentale. Les bassins néogènes catalans. Éditions du CNRS, Centre régional de publication Toulouse, 259 p.
- Mein P., Aymard J.** (1985) - Découvertes récentes de mammifères dans le Pliocène de Roussillon. Colloque Depéret, Perpignan, résumés, p. 25.
- Miat F.** (1936) - Sols agricoles du Roussillon. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 7, 7-3, p. 296-307.
- Michaux J.** (1976) - Découverte d'une faune de petits mammifères dans le Pliocène continental de la vallée de la Canteranne (Roussillon) ; ses conséquences stratigraphiques. *Bulletin Société géologique de France*, 7, XVIII, 1, p. 165-170.
- Monaco A.** (1971) - Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du plateau continental du Roussillon (Golfe du Lion). Thèse Doctorat Sciences Naturelle, Université de Perpignan, 295 p.
- Munsell Soil Color Book** (2013) - *Munsell soil-color charts*, 2009 year revised, Grand Rapids, Michigan, USA.
- Nash D., McLaren S.J.** (2003) - Kalahari valley calcretes : their nature, origins, and environmental significance. *Quaternary International*, 111, (1), p. 3-22.
- Nickel E.** (1982) - Alluvial-fan-carbonate facies with evaporites, Eocene Guarga Formation, Southern Pyrenees, Spain. *Sedimentology*, 29, p. 761-796.
- Pi-Pujol M.D., Buurman P.** (1997) - Authigenic palygorskite and smectite in early Paleogene paleo-soils of the SE Ebro basin (Catalonia, NE Spain). *Geologie en Mijnbouw*, 65, p. 287-296.
- Ruellan A.** (1973) - Morphology and distribution of calcareous soils in the Mediterranean and Desert regions. *Calcareous Soils, FAO Soils Bull.*, FAO, Roma, Italia, p. 7-15.
- Salvayre H., Sola C.** (1975) - Observations sur la stratigraphie et la néotectonique du Pliocène de la vallée de la Canteranne (P.O.). *Bulletin Société Géologique de France*, 17, p. 1121-1125.

Sanz M.E., Alonso-Zarza A.M., Calvo J.P. (1995) - Carbonate pond deposits related to semi-arid alluvial systems: examples from the Tertiary Madrid Basin, Spain. *Sedimentology*, 42, p. 437-452.

Servant J. (1970) - *Argelès-sur-Mer- Perpignan, Carte pédologique de France au 1/100 000, notice explicative*. Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Institut National de la Recherche Agronomique, 114 p.

Suc J.-P. (1976) - Apports de la palynologie à la connaissance du Pliocène du Roussillon. *Géobios*, 9, p. 741-771.

Tanner H. (2003) - Pedogenic features of the Chinle Group, Four corners region; evidence of Late Triassic aridification. In Lucas S.G., Semken S.C., Berglof W., Ulmer-Scholle D. (Eds), *Geology of the Zuni Plateau, New Mexico*, Geological Society 54th Annual Fall Field Conference Guidebook, p. 269-280.

Wright V.P., Tucker M.E. (1991) - *Calcretes*. Blackwell Scientific Publications, Carlton, Australia, 325 p.