



**HAL**  
open science

# Evolution des altérites du Crétacé supérieur à l'Eocène depuis la surface continentale vers l'endokarst Garrigues septentrionales du Gard et du sud Ardèche

Joël Jolivet, Didier Graillot, Erik van den Broeck

## ► To cite this version:

Joël Jolivet, Didier Graillot, Erik van den Broeck. Evolution des altérites du Crétacé supérieur à l'Eocène depuis la surface continentale vers l'endokarst Garrigues septentrionales du Gard et du sud Ardèche. *Karstologia Mémoires*, 2020, 75, pp.7 à 16. emse-02964677

**HAL Id: emse-02964677**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-02964677v1>**

Submitted on 25 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

***Evolution des altérites du Crétacé supérieur à l'Eocène depuis la surface continentale vers l'endokarst. Régions des garrigues septentrionales du Gard et du sud Ardèche.***  
***Evolution of Upper Cretaceous alterites to the Eocene from the continental surface towards the endokarst .Northern garrigue regions of Gard and southern Ardèche.***

JOLIVET Joël <sup>1</sup>, GRAILLOT Didier<sup>2</sup>, VAN DEN BROECK Erik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UMR 7300 ESPACE, Université de Nice-Sophia-Antipolis et CNRS, Département de Géographie.

<sup>2</sup>Université de Lyon, UMR 5600 EVS Environnement Ville Société, Mines-Saint Etienne.

<sup>3</sup>Groupement Associatif des Spéléologues d'Ornac l'Aven, d'Issirac et de La Bastide de Virac (G.A.S.O.I.L.), Nature-Témoin Issirac

Mots clés : Altérites, endokarst, Crétacé supérieur, géochimie, Gard, Ardèche

Keywords : Altérites, Endokarst, UpperCretaceous, Geochemistry, Gard, Ardèche

**Résumé :**

Le propos de cet article est de caractériser uniquement sur un plan géochimique (éléments majeurs, mineurs et traces), les processus d'altération et leurs conséquences sur les karsts des garrigues septentrionales du département du Gard et ceux du sud de l'Ardèche dont les cavités conservent des dépôts de sédiments du Crétacé supérieur et du Paléogène provenant de leur surface.

Le protocole de caractérisation fondé sur une analyse des échantillons par ICP-AES consiste à comparer les éléments constitutifs des terrains référencés sur les cartes géologiques avec ceux retrouvés dans différentes dépressions et anfractuosités épikarstiques et hypogées de l'endokarst. Ce protocole permet d'évaluer les différentes signatures chimiques et de rattacher des critères géologiques connus à des échantillons jusque-là inédits. Ces échantillons ont été prélevés de part et d'autre d'un axe NE-SO allant de la Dent de Rez au Mont Bouquet. Certains ont été extraits au SO de Bagnols sur Cèze ou dans la région d'Euzet.

La caractérisation géochimique des altérites prélevées dans les différentes séquences stratigraphiques du Crétacé inférieur jusqu'à l'Eocène supérieur permet de déduire que seules, les altérites de l'Eocène inférieur et moyen ont laissé leurs empreintes dans le karst. A partir de l'étude de leurs propriétés chimiques, la provenance de ces formations altéritiques via des systèmes lacustres carbonatés à salinité variable dont certaines traces sont encore visibles, peut être mise en évidence. Il est également possible d'en déduire leur contribution à la mise en place des structures aquifères karstiques du Barrémo-Bédoulien.

**Abstract:**

The purpose of this article is to characterize, only on a geochemical plan (major and minor elements and traces), the alteration processes and their consequences on the karsts of the northern scrublands of the Gard department and those of the southern Ardèche, where the caves

have conserved sediment depositions of late Cretaceous and Paleogene times, coming from their surface.

The protocol involves comparing the constituent elements of the grounds referenced on the geological maps with those found in various depressions and epikarstic ravins and hypogaea of the endokarst. This allows to assess the different chemical signatures and to link known geological criteria to samples, so far unprecedented. These samples have been taken on each side of a NE-SW axis between the Dent de Rez and the Mont Bouquet. Some have been extracted SW of Bagnols sur Cèze or in the Euzet region.

The geochemical characterization of the alterites taken from the different stratigraphic sequences from the Lower Cretaceous to the Upper Eocene suggests that only the lower and middle Eocene alterites left their foot prints in the karst. From the study of , the origin of these alterital formations via ancient hydrographic systems, some traces of which are still visible, can be highlighted. It is also possible to deduce their contribution to the establishment of karst aquifer structures of the Barremo-Bédoulien.

## **Introduction**

Les altérites au sens large sont des formations résiduelles issues de l'altération in situ de roches antérieures. Présentes dans les formations karstiques, elles ont fait l'objet d'une étude dans les terrains carbonatés du Crétacé périgourdin [Gourdon-Platel et Dubreuil 1992]. L'origine des altérites pédologique ou diagénétique dans des dolines ou cavités karstiques a été mise en évidence. Leur piégeage dans le réseau karstique des calcaires du Crétacé supérieur résulte de la redistribution différentielle de certains minéraux comme le fer et la silice. Ces travaux montrent l'importance des mécanismes géochimiques, témoins de l'activité paléogène d'un paléokarst et découvert par l'érosion post paléogène.

Les relations entre des formations superficielles comme les altérites et les karsts couverts sont aussi été étudiés [Salomon 2006]. Ces études montrent l'importance de la nature et de l'épaisseur des formations superficielles couvrant le substratum calcaire et qui provoquent leur crypto corrosion par l'intermédiaire des eaux d'infiltration plus ou moins abondantes et agressives.

Les altérites variées, allochtones ou autochtones constituant une véritable couverture, ont contribué à l'établissement de surfaces d'aplanissement crevées par des dolines [Bruxelles 2001]. Si les altérites se déplacent au cours du temps, on peut aussi s'interroger sur les facteurs qui interviennent dans leur déplacement comme la reptation (creeping) imperceptible des matériaux superficiels sous forme de particules [Géorepères 2014]. Le ruissellement hypodermique contribue à l'évacuation des éléments solubles et des colloïdes. Le rôle du ruissellement superficiel serait plus négligeable.

Une approche par caractérisation chimique des altérites a été envisagée par le BRGM [Maurizot et al. 2014] dans un contexte d'exploitation des ressources minérales que les altérites sont susceptibles de représenter.

Les transformations chimiques produites par les agents atmosphériques, le rôle de la percolation de l'eau, la mobilité des éléments chimiques ainsi que les mécanismes d'enrichissement ont été plus particulièrement étudiés. Par contre les volumes et les flux sont encore mal connus de même que les cinétiques de réaction et les taux d'altération spécifiques à chaque contexte géologique dont le karst.

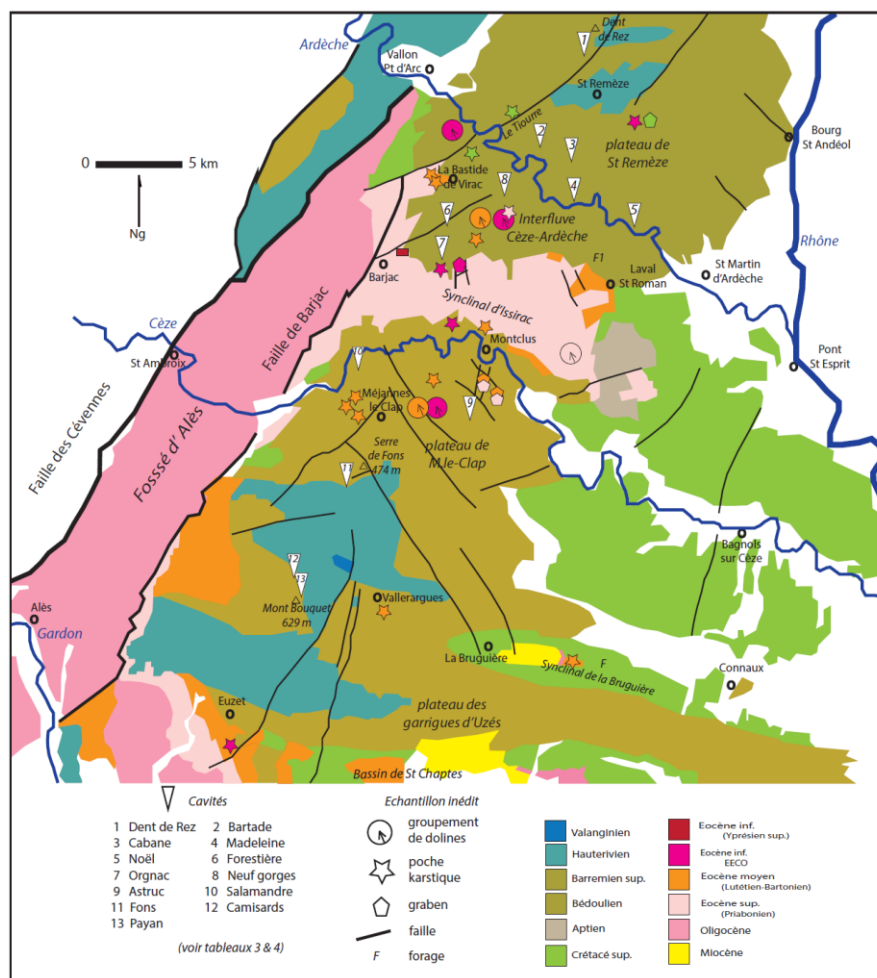
Enfin, plus récemment, dans l'étude morphokarstique de l'hydrosystème de la Cèze [Chadelle et Camus 2018] et plus précisément sur les caractéristiques géométriques et karstologiques du réservoir urgonien du plateau de Méjannes-le-Clap, le relevé des cartes morphokarstiques indique les sédiments et altérites repérées sur le terrain ainsi que les formes de surface qui rendent compte de l'activité karstique actuelle et surtout passée.

## 1 Contexte géologique, eustatique et climatique de la zone d'étude:

Les échantillons ont été prélevés de part et d'autre d'un axe NE-SO allant de la Dent de Rez au Mont Bouquet. Certains ont été extraits au SO de Bagnols sur Cèze ou dans la région d'Euzet (Carte 1).

La zone étudiée a été soumise à la géodynamique du méso-cénozoïque du Languedoc. Les archives sédimentaires du Crétacé inférieur livrent plus de détails sur les sédimentologies de faciès et les systèmes de dépôts depuis les travaux récents sur les réservoirs pétroliers et les aquifères [Bastide, 2014] contrairement à celles du Crétacé supérieur.

Dès le début du Crétacé supérieur, les grès à ciment calcaire correspondent à des oscillations eustatiques du Cénomaniens supérieur, du Turonien supérieur et du Coniacien qui sont entrecoupées par les épisodes détritiques continentaux de l'Albien inférieur, Cénomaniens moyen-supérieur et du Santonien.



Carte.1 - Carte géologique simplifiée avec les sites karstiques et cavités étudiés (J.Jolivet)  
Simplified geological map with the karst sites and caves studied. (J.Jolivet)

Les différentes phases de la convergence Ibérie-Eurasie provoquent les premières déformations pyrénéo-provençales à partir de la fin du Crétacé supérieur jusqu'à l'Eocène moyen [Leleu et al., 2009] et donnent lieu à une première phase compressive d'axe 20 à 60 °N et cassante 110 à 130°N.

Le Cénozoïque est contemporain de nombreux évènements géodynamiques, en particulier les orogènes pyrénéenne et alpine [Jolivet et al., 2017] qui ont perturbé les fluctuations eustatiques de l'Eocène.

Ces déformations ont des répercussions sur les structures du Crétacé et provoquent, entre autres, le synclinal d'Issirac et le sillon d'Alès. Elles fixent les remplissages sédimentaires du Paléogène qui correspond à une période de subsidence d'environ 200m. d'épaisseur

Les évènements climatiques semblent être contemporains des baisses de niveaux eustatiques sauf pour la période de l'Eocène moyen qui montre une élévation du niveau marin [Cramer et al. 2011]. Sous climat tropical à subtropical, les périodes du Crétacé supérieur et du Paléogène sont entrecoupées par des événements anoxiques océaniques (EAO) avec une diminution du %  $\delta^{18}\text{O}$ , qui ont pour conséquence des altérations chimiques intenses de la surface continentale liées aux évolutions des circulations océaniques [Donnadieu et al., 2016] et peut être aux activités volcaniques du Massif Central durant ces époques:

- L'EAO 1 à l'Albien inférieur-moyen, l'EAO 2 au Cénomaniens moyen- supérieur et l'EAO 3 au Santonien.
- Le PETM (*Paléocène-Eocène Thermal Maximum*) à la coupure Paléocène - Eocène (e3-e4),
- L'EEO (*Early Eocene Climatic Optimum*) à l'Eocène Inférieur (e4) et MECO (*Middle Eocene Climatic Optimum*) au Bartonien inférieur (e6) [Cramer et al. 2009]. (figure1)

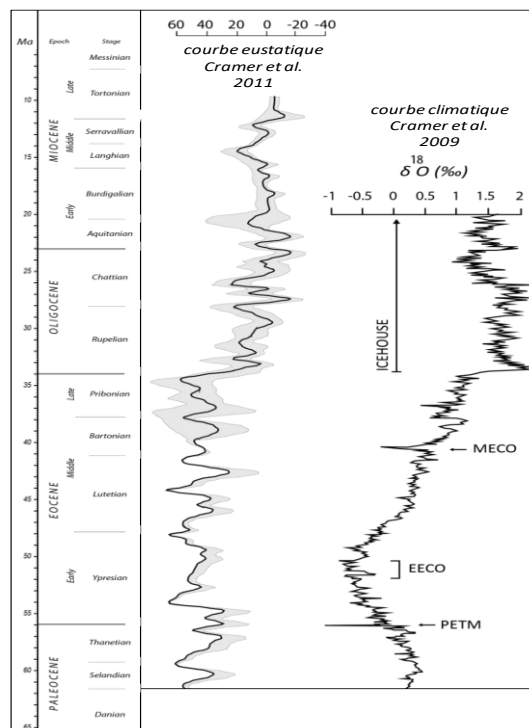


Figure 1 -Chartes eustatique (Cramer et al., 2011) et climatique) du Cénozoïque.  
Eustatic (Cramer et al., 2011) and climatic (Cramer et al.2009) charters of the du Cenozoic

## **2 – Processus d'altération :**

Le contexte d'altération dépend des caractéristiques chimiques des eaux météoriques, qui participent à l'humification en provoquant l'altération des silicates par consommation d'eau, de CO<sub>2</sub> dissout et d'acides humiques. Cette hydrolyse produit sur la surface carbonatée des ions calcium et bicarbonates ainsi que des argiles comme la kaolinite. La désorganisation tectonosédimentaire (brèches, failles) facilite ces transformations et provoque une altération superficielle des calcaires.

Dans l'endokarst, l'équilibre calco-carbonique s'opère en quelques mètres de traversée dans l'encaissant passant ainsi d'un pH < à 6.0 à un pH > à 7.5 avec une hausse des matières totales dissoutes rendant alcalins les remplissages en cours d'infiltration. Le degré d'altération chimique est évalué ici d'après l'index d'altération chimique (CIA) [Nesbitt et Young 1982]:  
$$CIA = (Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) \times 100.$$

Ce degré ou taux d'altération correspond à la somme des processus d'altération supergène et diagénétique. En général le baryum, le strontium ou l'alumine augmentent quand l'altération s'intensifie. Les éléments de transition (Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Y, Nb), en solution aqueuse, sont attaqués par les acides qui favorisent les réactions d'oxydoréduction et de précipitation. Les roches altérées contiennent beaucoup plus d'eau de constitution que les roches saines.

La kaolinite domine dans les calcaires gréseux du Crétacé supérieur et les marnes sableuses de l'Eocène moyen. Présente dans les roches silto-argileuses et dans les calcaires, la muscovite est accompagnée de kaolinite et montmorillonite. Elle résulte d'une désorganisation de la structure de minéraux tels que les grès micacés et reste longtemps inaltérée. Ces éléments sont présents dans de nombreux échantillons.

Le pourcentage d'alumine de la roche saine progressivement lessivée augmente dans les altérites sous forme de minéraux argileux alumineux. Elle est souvent considérée comme un élément inerte dans le système de l'altération [Potdevin, 1987]. Produit de l'altération des roches cristallines et en particulier des feldspaths potassiques, le baryum a été lessivé et ses concentrations sont liées aux dépôts grésocalcaires. Le strontium est présent dans différents minéraux comme les carbonates et les sulfates dont les composés solubles se retrouvent dans l'eau de mer. Il migre dans les roches altérées.

Les colonnes sédimentaires peuvent être marquées par d'importantes fluctuations des teneurs en éléments majeurs et de transition en relation avec l'alternance lithologique de niveaux plus argileux et silteux. L'étude de ces constituants permet d'en déduire la présence de drains préférentiels qui ont remobilisés les éléments les plus solubles. Ainsi les minéraux primaires altérés, comme la silice et secondaires néoformés, sont évacués depuis les bassins versants vers l'endokarst.

## **3 – Méthodologie d'analyse des processus d'altération**

### **3.1. Protocole de prélèvements :**

Les échantillons de surface ont été collectés en fonction de la localisation des étages spécifiés sur les cartes géologiques de Bourg St Andéol, (889) Pont St Esprit (913), d'Alès (912) et d'Uzès (939). Les prélèvements exokarstiques ont été prélevés dans un grand nombre de dolines, grabens ou couloirs karstiques. De même, les échantillons endokarstiques ont été prélevés dans les cavités aux morphologies variées comme les grottes de la Dent de Rez (photo 1), de Fons, de Payan ou des Camisards. Ces cavités sont recoupées par des reculs de versant, des diaclases transversales mises à jour par des tunnels d'aménagement comme aux avens d'Orgnac et de la Salamandre ou bien par des galeries et des hauts de cheminées à dynamique syngénétique ou paragénétique qui n'ont pas été complètement comblées (Noël, Bartade, Madeleine, Cabane, Forestière et Astruc).

Les résultats analytiques exposés ne comprennent que les éléments dont la variabilité chimique présente des contrastes significatifs (figures 3 et 4).



*Photo 1 - grotte de la Dent de Rez (07) recoupée par recul de versant  
Grotte de la Dent de Rez (07) intersected by slope backing. (cliché : Erik Van Den Broeck)*

## **3.2 Méthodes d'analyse des échantillons**

### **3.2.1. Techniques d'analyse: Analyse par Spectrométrie d'Emission Atomique à Source Plasma (ICP-AES)**

La spectrométrie d'émission atomique-plasma à couplage inductif (ICP-AES) est une technique d'analyse simultanée des éléments majeurs et mineurs. Les caractéristiques principales sont les suivantes:

- Détermination de plus de 70 éléments
- Limite de détection :  $10^{\text{aine}}$  pp ( $\mu\text{g/L}$ )
- Gamme spectrale étendue de 160 à 800 nm
- Passeur automatique d'échantillons



*Photo2 : Analyse par Spectrométrie d'Emission Atomique à Source Plasma (ICP-AES)  
Analysis by Spectrometry of Atomic Emission at Source Plasma(ICP-AES)*

La spectrométrie d'émission à source plasma à couplage induit (ICP-AES) est utilisée pour l'analyse de minéraux séparés et nécessite une faible quantité de matière : 50 mg. Les analyses ont été effectuées sur un Spectroanalyseur séquentiel haute résolution Jobin-Yvon JY138 Ultrace intégré dans une plateforme analytique qui prévoit des procédures à deux niveaux: en amont pour la préparation des solutions, en aval pour l'étalonnage et la validation des résultats produits [Moutte 2018].

Le principal point fort de l'ICP-AES est d'être pratiquement insensible aux 'effets de matrice', un élément donné ayant la même réponse en émission quelle que soit la composition de la matrice qui le contient. Le fonctionnement de l'ICP est optimisé à l'aide d'un système d'introduction des échantillon. Les analyses se font par extraction sélective des différentes fractions d'un échantillon (carbonates, phosphates, sulfures, silicates). Il est possible de mesurer des teneurs en éléments traces : Sc, V, Cr ; des éléments légers : Li, Be et quelques terres rares (La, Ce, Eu, Y, Yb).

### **3.2.2. Traitement des données**

Il est indispensable, de mesurer au cours des analyses, en tant qu'inconnus, des échantillons de composition connue qui permettront de valider les résultats. La précision pour tous les éléments analysés est de 10 ppm. Pour toutes les lignes analytiques utilisées, c'est une teneur suffisante pour donner un signal significatif, et mesurer avec la précision nécessaire

## **4 - Résultats: Analyse des processus d'altération dans les différentes formations**

Les séquences stratigraphiques concernées par les prélèvements vont du Crétacé inférieur à l'Eocène supérieur (figure 2)



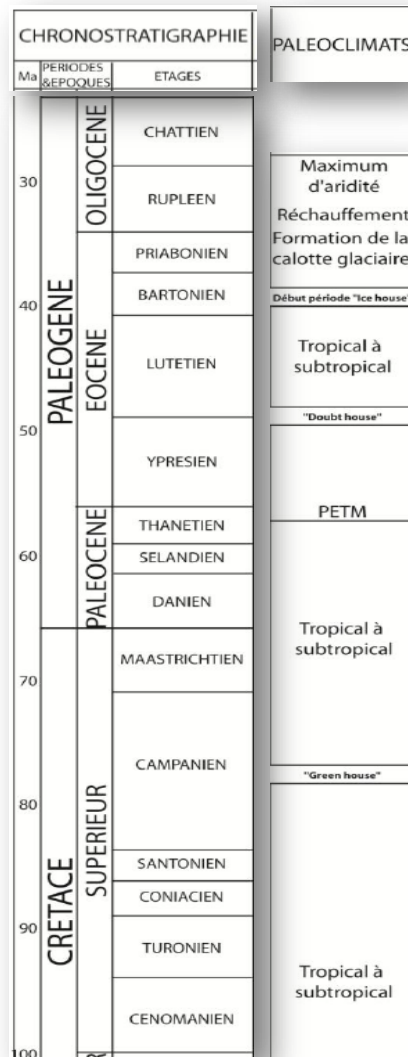


Figure 2: Séquences stratigraphiques des zones de prélèvements  
(modifié d'après Camus (2003) et Dörfliger (2008))  
Stratigraphic sequences of sampling areas  
(modified after Camus (2003) and Dörfliger (2008))

Les échantillons ont été prélevés en surface et en cavités et correspondent à différentes formes karstiques (graben, dolines, poches karstiques).

#### 4.1.- Crétacé inférieur :

Le crétacé inférieur est représenté par une partie du Néocomien (Valanginien et Haurerivien) et du Barrémien-Aptien (Bédoulien) sur l'ensemble des hautes garrigues du plateau de St Remèze, de l'interfluve Cèze-Ardèche et du plateau de Méjannes-le-Clap relié à celui, plus méridional, des garrigues d'Uzès.

La stratigraphie séquentielle du Barrémien inférieur à l'Aptien inférieur (Bédoulien) regroupe sept séquences de dépôts correspondant à des milieux marins spécifiques [Bastide, 2014]. Leurs textures, boues et cimentations de dépôts ont, à travers leurs compositions et leurs porosités

primaires et secondaires, des aptitudes à la karstification pouvant favoriser les processus d'altération.

Certains intervalles de séquences de dépôts correspondent à des transgressions marines dont les limites coïncident à d'importantes surfaces d'émersion et de karstification comme celle au sommet du cortège transgressif (*HST*) de la troisième séquence de dépôt du Barrémien supérieur. Cette surface d'émersion recoupe des paléofractures partiellement colmatées par des argiles rouges ou des sables calcaires ou siliceux dont plusieurs sont datés, d'après les analyses géochimiques, du Cuisien /Lutétien inférieur ou Lutétien /Bartonien inférieur. Ces interfaces entre séquences ont contribué au développement de cavités karstiques comme pour les grottes de Payan, Camisards, Fons ou de la Dent de Rez.

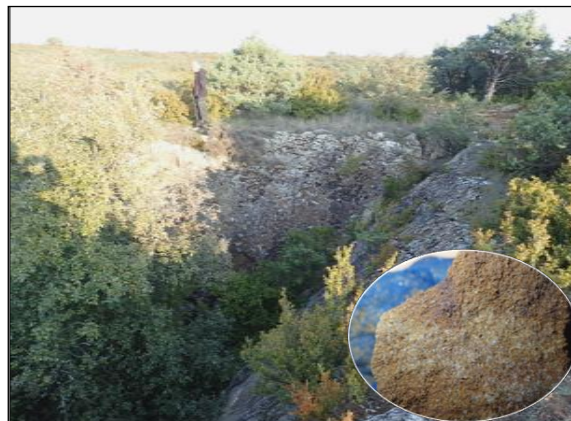
La porosité totale des calcaires du Barrémien inférieur est variable en fonction des formations sédimentaires. Elle peut varier de 1 à 3% pour les faciès marneux et micritiques et de 6 à 7% pour les biosparites. Pour le Barrémien supérieur, les faciès crayeux et micritiques ont une porosité qui peut atteindre 10% et qui peut induire une altération de la roche, tandis que celle des calcaires compacts est inférieure à 1%. [Masse, 1989]. Les porosités sont donc variables dans la plate-forme urgonienne dont la puissance est supérieure à 400m (forage du Garn -F1).

#### 4.2. Crétacé supérieur :

Les dépôts du Crétacé supérieur sont bien représentés dans la partie est du fossé d'Alès et à l'ouest de la vallée du Rhône encadrant ainsi les calcaires barrémo-aptien des zones sus-citées. Certains éléments se retrouvent en bordure du bassin de St Chaptès ou le synclinal de la Bruguière. Leur épaisseur peut dépasser 130 mètres comme dans le forage de Pognadoresses - Les Puechs (FR\_2016 BSS002PSZX (F)) et voire 500 mètres sur la bordure rhodanienne.

Sur les plateaux, le Turonien s'aligne en pointement le long des failles transformantes comme dans la vallée du Tiourre ou au nord ouest de la Bastide de Virac (carte géologique Bourg St Andéol (889)). Des observations récentes ont permis de trouver au sud-est de ce village, une lanière grés-sableuse riche en oxyde de fer, très altérée, toujours au niveau d'une faille de même structure, datant du Cénomaniens inférieur.

A l'Est de St Remèze, des grés quartzitiques peu altérés du Cénomaniens inférieur tapissent les parois d'un petit graben situé à 380 mètres NGF (photo 3).



*Photo 3 - Petit graben à l'est de St Remèze (07) avec dépôt de grés quartzitique. (cliché: Joël Jolivet)*  
*Small graben east of St Remèze (07) with quartzitics and stone deposits. (photo: Joël Jolivet)*

Quelques éléments très épars arrachés aux bordures du fossé d'Alès parsèment le plateau de Méjannes-le-Clap et résultent des transports paléo fluviatiles parcourant le plateau au Miocène.

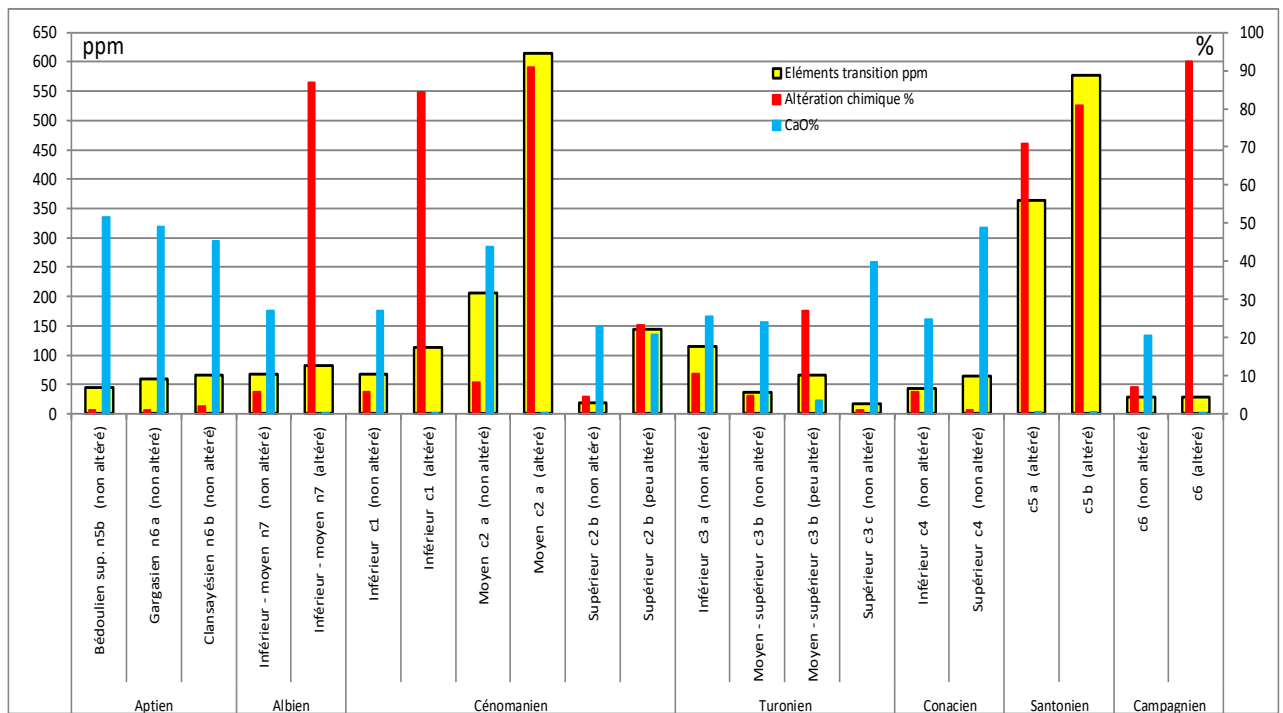
La quasi absence de ces couvertures sur le reste de la surface étudiée, tant au niveau des phénomènes exo et endo karstiques, suppose (i) une ablation totale par l'érosion aréolaire et linéaire (ii) un remaniement des formations détritiques et la continuité de l'action chimique au profit des formations du Paléogène.

Les EAO(s) marquent l'augmentation du % de l'altération chimique et la fraction massique des éléments de transition ainsi que celle de la silice tandis que celui de la chaux diminue fortement (tableau1, figures3 et 4).

		Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	SiO2 %	Al2O3 %	Sr ppm	Ba ppm	SiO2 /Al2O3 mol.
<b>Aptien</b>	Bédoulien sup. n5b (non altéré)	44	1,0	51,6	7	0,5	197	13	11
	Gargasien n6 a (non altéré)	60	1,1	49,2	72	0,5	473	12	113
	Clansayésien n6 b (non altéré)	66	1,9	45,3	15	0,9	452	17	15
<b>Albien</b>	Inférieur - moyen n7 (non altéré)	68	5,7	27,1	48	1,7	115	86	24
	Inférieur - moyen n7 (altéré)	82	86,9	0,1	93	1,8	261	104	45
<b>Cénomanién</b>	Inférieur c1 (non altéré)	68	5,7	27,1	48	1,7	50	86	24
	Inférieur c1 (altéré)	114	84,3	0,2	89	4,0	115	80	19
	Moyen c2 a (non altéré)	207	8,2	43,9	13	3,9	204	22	3
	Moyen c2 a (altéré)	614	90,9	0,3	67	4,8	264	163	12
	Supérieur c2 b (non altéré)	19	4,6	23,1	56	1,1	155	172	43
<b>Turonien</b>	Supérieur c2 b (peu altéré)	143	23,4	20,7	53	1,9	287	34	8
	Inférieur c3 a (non altéré)	115	10,4	25,6	48	3,0	190	99	14
	Moyen - supérieur c3 b (non altéré)	36	4,6	24,1	55	1,2	40	70	39
	Moyen - supérieur c3 b (peu altéré)	66	27,1	3,4	87	2,7	10	149	66
	Supérieur c3 c (non altéré)	17	1,1	39,7	29	0,4	264	760	57
<b>Conacien</b>	Inférieur c4 (non altéré)	43	5,7	24,8	54	1,5	67	20	31
	Supérieur c4 (non altéré)	64	1,1	48,8	10	0,5	155	29	16
<b>Santonien</b>	c5 a (altéré)	364	70,8	0,4	45	4,2	190	663	9
	c5 b (altéré)	577	81,0	0,5	71	9,6	40	615	6
<b>Campagnien</b>	c6 (non altéré)	28	6,9	20,6	61	1,5	16	19	34
	c6 (altéré)	29	92,4	0,1	96	2,2	10	16	37

Tableau 1 - Valeurs brutes des analyses géochimiques des quelques éléments majeurs, de transition et traces des couvertures du Crétacé supérieur encadrant les calcaires Barrémo-Aptien de la zone étudiée.

*Geochemical raw values of several elements at major, transitional and trace levels in upper Cretaceous cover framing the Barremo-Aptien limestones of the zone understudy.*



*Figure. 3- Analyses géochimiques des quelques éléments majeurs, de transition et traces des couvertures du Crétacé supérieur encadrant les calcaires Barrémo-Aptien de la zone étudiée.  
Geochemical analysis of several elements at major, transitional and trace levels in upper Cretaceous cover framing the Barremo-Aptien limestones of the zone understudy.*

Le baryum se retrouve en forte concentration dans les formations détritiques du Turonien supérieur et du Santonien alors que le strontium marque les phases de dépôts des transgressions marines du Crétacé supérieur (figure4). L'intense altération qui découle de l'ensemble de ces phénomènes à la fin de cette époque peut être comparée à une latérisation qui va perdurer jusqu'à l'Eocène moyen.

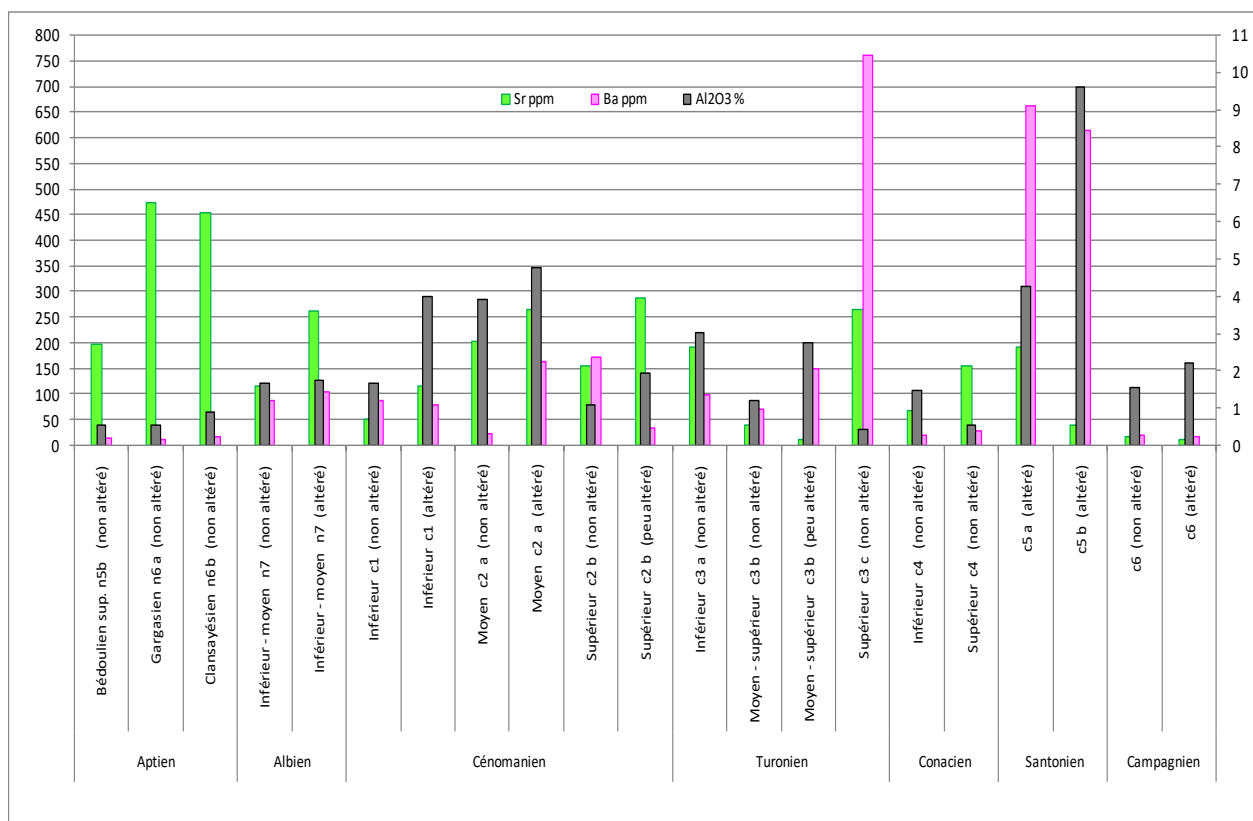


Figure 4- Analyses géochimiques des quelques éléments majeurs, de transition et traces des couvertures du Crétacé supérieur encadrant les calcaires Barrémo-Aptien de la zone étudiée.

Geochemical analysis of several elements at major, transitional and trace levels in upper Cretaceous covers framing the Barremo-Aptien limestones of the zone understudy

### 4.3. Eocène inférieur :

L'Eocène inférieur est divisé en deux sous-étages : l'Yprésien et le Cuisien. L'Yprésien correspond d'abord à une sédimentation argilo-ligniteuse (Sparnacien) suivie d'une sédimentation silicoclastique représentant des environnements marins (Cuisien).

On distinguera les échantillons de surface, ceux prélevés dans l'endokarst et les échantillons exokarstiques.

#### - Echantillons de surface :

Traduit par le sigle e1-4 ou e-c en fonction des cartes géologiques, le Paléocène et Eocène inférieur ne sont pas différenciés. Les observations et analyses effectuées sur les divers prélèvements n'ont permis de distinguer que le Cuisien. (tableau 2)

Les formations de l'Eocène inférieur se caractérisent au nord de Barjac par des sables siliceux rouge à jaune surmontés par endroit d'une carapace ferrugineuse (photo 4) ou, dans la plupart des cas, par des marnes sableuses rouges à brunes qui se situent sur la bordure nord du synclinal d'Issirac, à l'est du fossé d'Alès ou à l'est du village d'Euzet. Ces sédiments héritent des décharges détritiques du Santonien.



Photo 4 - Yprésien supérieur au nord de Barjac (30).  
Upper Ypresian north of Barjac (30). (photo: Joël Jolivet)

Les analyses géochimiques dégagent deux périodes d'altération, nommées ici post PETM et EECO (tableau 2) et positionnées par rapport à la courbe de Cramer (2009) (figure.1). Ces résultats montrent un accroissement des éléments chimiques proportionnel au % d'altération sauf pour le CaO qui décroît en raison de l'acidification des eaux durant l'Optimum Climatique de l'Eocène inférieur (EECO). Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traduit ici l'accumulation progressive d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lors de la formation des minéraux argileux.

<i>Eocène inférieur</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Ba ppm	Sr ppm	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol		Zone
e4 - post PETM	343	41	16	12	44	52	162	3,2	Echantillons de surface	Int. Cèze-Ardèche et Euzet
e4 - EECO	378	77	1,4	17	63	339	105	3,1		
Cuisien (sable marin) <i>lacune sédimentaire</i>	84	62	0,03	3	93	281	39	30		
<i>Eocène inférieur</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Ba ppm	Sr ppm	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol		Zone
e4 - post PETM ?	507	64	7,1	14	54	135	80	3,3	graben	Pl. St Remèze
e4 - EECO	347	77	0,6	14	66	452	78	4,1	doline	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	404	80	0,8	16	63	470	80	3,4	doline	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	351	70	4,0	13	64	258	44	4,1	poche karst.	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	455	81	0,9	17	61	436	81	3,0	doline	pl.Méjannes le Clap
<i>Eocène inférieur</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	Ba ppm	Sr ppm	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> mol		Zone
e4 - EECO	737	80	5,0	21	49	166	56	2,1	Bartade	Pl. St Remèze
e4 - EECO	476	82	1,5	15	63	265	71	3,5	Noël	Pl. St Remèze
e4 - EECO	449	81	1,2	17	62	394	81	3,3	Madeleine	Pl. St Remèze
e4 - EECO	414	84	1,3	14	67	248	62	4,1	Cabane	Pl. St Remèze
e4 - EECO	1029	94	1,2	28	40	105	36	1,2	Forestière	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	576	82	3,2	18	59	360	65	2,9	Orgnac	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	929	80	5,6	26	37	152	59	1,2	9 Gorges	Int. Cèze-Ardèche
e4 - EECO	671	72	1,2	19	40	106	42	1,8	Astruc	pl.Méjannes le Clap
e4 - EECO	365	69	4,0	17	60	578	75	3,0	Salamandre	pl.Méjannes le Clap
Cuisien (sable marin)	113	66	0,4	8	82	542	71	8,3	Salamandre	pl.Méjannes le Clap
e4 - EECO	601	73	1,9	22	37	101	80	1,4	Camisards	Mt Bouquet
e4 - EECO	446	83	1,3	22	47	119	66	1,8	Payan	Mt Bouquet

Tableau. 2 - Principaux éléments géochimiques des échantillons de l'Eocène inférieur (valeurs brutes)  
Main geochemical elements of samples from the lower Eocene(raw data)

- Echantillons des formes exokarstiques :

Ils se retrouvent à l'état de traces. Cette oblitération sédimentaire a contribué au processus de crypto-altération.

**- Echantillons endokarstiques :**

Dans la plupart des échantillons, le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  tend vers un processus de monosiallisation dû au lessivage partiel de la silice, du baryum et du strontium.

Le % d'altération croît légèrement ainsi que celui des éléments de transition tandis que la fraction massique du baryum et du strontium diminue.

**4.4. Eocène moyen :**

L'éocène moyen se retrouve dans le synclinal d'Issirac dont l'épaisseur est en moyenne d'environ 25 mètres. Elle peut atteindre jusqu'à 40 mètres au NE du village de Montclus et 300 mètres dans le fossé d'Alès (forages Mar-01 et 04 – SNPLM : *Société Nationale de Pétrole de Languedoc-Méditerranée*). Les étages concernés sont le Lutétien et le Bartonien.

***Lutétien :***

La sédimentation du Lutétien est caractérisée par des dépôts marins carbonatés entre deux périodes purement détritiques terrigènes de l'Yprésien supérieur et du Bartonien inférieur. Cette sédimentation se retrouve dans la plupart des cas aux périphéries immédiates des terrains de l'Eocène inférieur ou Priabonien comme à la Bastide de Virac. Des traces subsistent sur un site à l'ouest de l'aven d'Ornac.

L'altération chimique durant cette époque est négligeable libérant peu d'éléments de transition. Les échantillons des formes exokarstiques conservent leur taux de strontium alors que ce dernier est lessivé dans l'endokarst (tableau 3).

<i>Lutétien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 indifférentié	16	0,7	55	0,4	1,8	9	109	4,9	Echantillons de surface	interfluve. Cèze-Ardèche
e5 supérieur	73	3,4	49	1,2	9,7	48	260	5,9		interfluve. Cèze-Ardèche
<i>Lutétien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 indifférentié	21	0,1	52	0,05	0,5	11	319	9,1	graben	pl. Méjannes le Clap
e5 indifférentié	27	0,8	55	0,4	2,0	7	117	3,9	poche karst.	pl. Méjannes le Clap
e5 indifférentié	57	1,2	48	0,6	9,5	16	270	13,4	doline	interfluve. Cèze-Ardèche
e5 supérieur	75	3,1	54	1,8	1,8	7	91	0,9	laminite	Vallérargues
<i>Lutétien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 indifférentié	48	1,5	52	0,8	3,8	7	48	4,1	Forestière	interfluve. Cèze-Ardèche
e5 supérieur	61	2,9	51	1,5	4,1	12	80	2,5	Dent de Rez	Pl. St Remèze
e5 supérieur	63	3,5	50	1,8	7,1	18	113	5,3	Fons	pl. Méjannes le Clap
<i>Bartoniien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 / e6 basal	69	3,5	40	1,5	21	34	375	12,5	Echantillons de surface	interfluve. Cèze-Ardèche
e5 / e6 basal	77	5,6	43	2,6	16	38	62	5,4		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur	106	27	9	3,5	76	60	39	18,7		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur	162	26	13	4,6	65	120	78	12,0		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur	210	41	9	6,4	68	85	60	9,0		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur- MECO	249	66	3	7,0	76	105	32	9,3		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur- MECO	258	84	0,5	7,3	79	128	63	9,3		interfluve. Cèze-Ardèche
e6 (sable marin)	55	54	0,3	0,3	98	44	6	> 50		interfluve. Cèze-Ardèche
e6-7 moyen ?	132	26	18	7,0	52	188	179	6,3		interfluve. Cèze-Ardèche
<i>lacune sédimentaire</i>										
<i>Bartoniien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 / e6 basal	49	4,9	45	2,3	15	21	112	5,6	poche karst.	interfluve. Cèze-Ardèche
e5 / e6 basal	81	4,2	48	2,2	8	75	319	3,2	poche karst.	pl. Méjannes le Clap
e5 / e6 basal	84	4,1	46	2,0	10	17	40	4,1	doline	pl. Méjannes le Clap
e6 inférieur- MECO	190	65	2,6	6,2	82	170	27	11,2	poche karst.	interfluve. Cèze-Ardèche
e6 inférieur- MECO	235	70	2,6	6,9	81	50	26	10,0	poche karst.	pl. Méjannes le Clap
e6 inférieur- MECO	174	78	0,9	5,6	84	95	41	12,6	contact faille	Int. Cèze-Ardèche
<i>Bartoniien</i>	Eléments transition ppm	Altération chimique %	CaO%	Al2O3 %	SiO2 %	Ba ppm	Sr ppm	SiO2/Al2O3 mol		Zone
e5 / e6 basal	143	6,9	47	3,5	7	35	54	1,7	Dent de Rez	Pl. St Remèze
e5 / e6 basal	98	6,0	45	2,9	11	46	56	3,3	Salamandre	pl. Méjannes le Clap
e5 / e6 basal	95	5,7	45	2,7	13	23	20	4,2	Fons	pl. Méjannes le Clap
e5 / e6 basal	100	4,7	41	2,0	16	16	54	6,7	Camisards	Mt Bouquet
e6 inférieur- MECO	404	69	3,5	8,6	72	41	64	7,2	Camisards	Mt Bouquet
e6 inférieur- MECO	329	72	1,9	9,1	78	241	50	7,3	Noël	Pl. St Remèze

Tableau. 3 - Principaux éléments géochimiques des échantillons de l'Eocène moyen (valeurs brutes)  
Main geochemical elements of samples from the middle Eocene (raw data)

### **Bartoniien :**

Pendant la période du Bartonien, une sédimentation silicoclastique, puis carbonatée s'installe. Le Bartonien est composé ici de formations sédimentaires silicoclastiques du Lutétien supérieur/Bartoniien basal et du Bartonien inférieur (Auversien) et caractérisé par l'absence sédimentaire carbonatée au Marinésien.

Comme pour les étages précédents, les terrains bartoniens se situent dans les mêmes zones mais sur de plus vastes-étendues. Le Bartonien inférieur (e6) se distingue du Bartonien basal (e5/e6) par l'augmentation massique des éléments de transition liés à celle du pourcentage d'altération chimique et à la chute de celui du CaO indicateur de l'événement anoxique océanique MECO spécifique au Bartonien inférieur bien marqué par les calcaires à Cérithes (tableau. 4). Cette transition se retrouve tant au niveau des formes exokarstiques dans que l'endokarst.

### **4.5 - Eocène supérieur :**



L'étage principal concerne le Priabonien et l'Oligocène basal.

**- Priabonien :**

Il est représenté par des marnes et des carbonates laguno-lacustres mais qui peuvent se substituer à des dépôts évaporitiques qui donnent lieu à quatre paraséquences comportant huit unités de dépôts. [Bouche, 2011], [Lettéron, 2017]. L'épaisseur des formations du Priabonien varie de 130 et 900mètres respectivement dans le synclinal d'Issirac et dans le fossé d'Alès.

L'intervalle Priabonien supérieur / Oligocène basal marque une grande rupture climatique correspondant au passage Icehouse (figure 1) que traduit l'augmentation des valeurs du  $\delta^{18}\text{O}$  [Zachos et al. 2008]. Les marnes du Priabonien sont bien conservées dans des grabens au sud du village de Montclus, dans quelques dépressions à l'ouest de l'aven d'Orgnac ainsi qu'au sud-ouest de la Bastide de Virac à 400m d'altitude. Peu dégradées, leur signature géochimique n'a pas été décelée dans l'endokarst.

**Exemples de remplissage dans les grottes de la Salamandre et de la Madeleine :**

La géodynamique du Paléogène a créé de nombreuses formations discontinues qui, associées au climat tropical à subtropical et aux conditions anoxiques du Crétacé supérieur et de l'Eocène inférieur et moyen, ont favorisé l'apparition de processus corrosifs donnant lieu à des couvertures altéritiques.

Cette agression chimique n'a cependant joué que sur les premiers mètres de l'encaissant carbonaté, inhibée ensuite par la capacité des eaux d'infiltration à atteindre rapidement leur équilibre calco-carbonique. Ainsi, aucune altération des calcaires du Barrémien supérieur - Bédoulien n'a pu être constatée à l'interface colmatage - paroi des poches karstiques.

Suite au recul des couvertures, les altérites, devenues alcalines, ont pénétré la zone vadose soit par gravité avec entraînement par infiltration des eaux météoriques, soit par exhaussement et/ou abaissement des surfaces d'aplanissement donnant lieu à des érosions latérales de versant ou bien à des échanges d'eau de rivière avec celle du karst.



*Photo 5 - Sables siliceux non compactés entre 2 séquences de sables indurés dans un couloir karstique. A proximité, un autre couloir vidé de son remplissage. Aven de la Salamandre (30) (cliché: Joël Jolivet)*

*Non cohesive siliceous sands between 2 sequences of hardened sands in a karst corridor. Nearby, another corridor stripped of its filling. Aven de la Salamandre (30) (photo: Joël Jolivet)*

Pour la grotte de la Salamandre, la mise en place d'une nappe phréatique à faible énergie a provoqué un classement granulométrique entre les colloïdes et les sables qui, entre deux séquences de calme hydraulique, a favorisé un processus de stratification interne des sédiments indicateur d'une origine diagénétique précoce (photo 5). Quatre prélèvements réalisés dans de petits couloirs karstiques recoupés par le tunnel artificiel, ont déterminé que les sédiments datent de l'Eocène inférieur et moyen (tableaux 2 et 3).

La topographie des tunnels artificiels étant de droit privé, il est impossible ici de reproduire leur tracé.

A l'inverse, dans le cadre de la grotte de la Madeleine, une haute énergie disperse la matière argileuse en suspension dans l'ensemble de la nappe aquifère comme l'attestent les comblements actuels des galeries (photo 6).

12 échantillons ont été prélevés dans cette cavité et ce, sur une gamme altimétrique allant de 190 à 140m NGF dans divers conduits horizontaux et verticaux. Ne sera évoquée ici que la constitution géochimique des produits d'horizon éluvial déposés que révèlent les analyses ICP-AES. Au regard de ces dernières, il apparaît une constante dans les résultats analytiques synthétisés dans le tableau ci-dessous (tableau 4) :

%												ppm														Total éléments	SiO <sub>2</sub>	Altération chimique (%)	
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Y	Nb	Ba	La	Ce	Eu	Yb	Th	de transition (ppm)		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
61.9	1.0	16.6	6.5	0.1	1.0	1.2	0.3	2.4	0.2	26	15	149	113	20	57	30	141	81	36	28	394	51	107	2	3	15	449	3.3	81

Tableau.4- Moyenne analytique sur les 12 prélèvements de la grotte de la Madeleine.  
Analytical average on the 12 samples of the grotte de la Madeleine.

Les teneurs en silice (SiO<sub>2</sub>) et en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) montrent une forte proportion en aluminosilicates et en quartz tandis que la concentration en K<sub>2</sub>O souligne révèle la présence d'illite. Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> traduit la présence de kaolinite et de smectite alors qu'un fort taux d'altération chimique couplé au total des éléments de transition, liés à la faible teneur en chaux (CaO), sont révélateurs d'événements anoxiques tels que PETM et ECCO survenus à l'Eocène inférieur. (figure1).

Les rythmites de la salle du Chaos dans la grotte de la Madeleine, correspondent à une sédimentation argilo-limoneuse, stratifiée en lamines plus ou moins épaisses de couleurs passant alternativement du brun-rouge au blanc et parfois au gris cendré. Cet imposant colmatage dont il ne reste qu'une partie adossée à la paroi de la galerie, montre des structures de dislocation et de retrait dues à des phases de dessiccation et de tassement [Billaud, 1979].



Photo 6 - Reliquat de colmatage avec rythmites bicolores (salle du Chaos - grotte de la Madeleine (07))  
 Clogging residue with bicolored rhythmites (salle du Chaos - grotte de la Madeleine (07)) (photo: Joël Jolivet)

Deux séquences sédimentaires, une blanche et l'autre brune ont été analysées : Elles présentent des caractéristiques analytiques similaires aux autres échantillons sauf pour la rythmite blanche qui possède des variations au niveau de la silice, de l'alumine, du potassium et surtout du baryum (Figure 5).

Ces alternances peuvent correspondre à des cyclothèmes représentant diverses conditions physiques de sédimentation éventuellement rattachées à des périodicités climatiques au regard de leurs emplacements à moins de 150 mètres de la rivière Ardèche. Chaque nouvel apport détritique signifie un important changement dans le cycle sédimentaire qui peut être dû par exemple, aux échanges entre l'eau du karst et celle de la rivière.

Ce processus d'échange entre eaux du karst et eau de rivière perturbe la logique chimique des phénomènes d'altération en faisant intervenir d'autres facteurs comme la turbulence du milieu aqueux. Lors de la décantation des colloïdes, cette turbulence va faciliter la solubilité du baryum, alors que l'alumine est insoluble. Il s'ensuit une aggradation de l'argile qui, en zone confinée favorisant la diagenèse, fixe dans la superposition de ses feuillets les ions et mobilise des éléments comme le baryum ou le strontium.

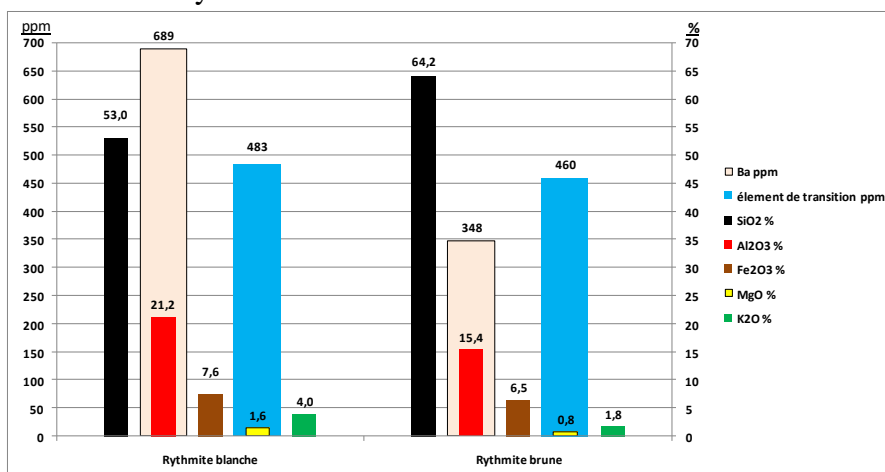


Figure.5 - Variations de plusieurs éléments chimiques dans les rythmites de la grotte de la Madeleine  
 Variations of several chemical elements in the rhythmites in the Madeleine cave

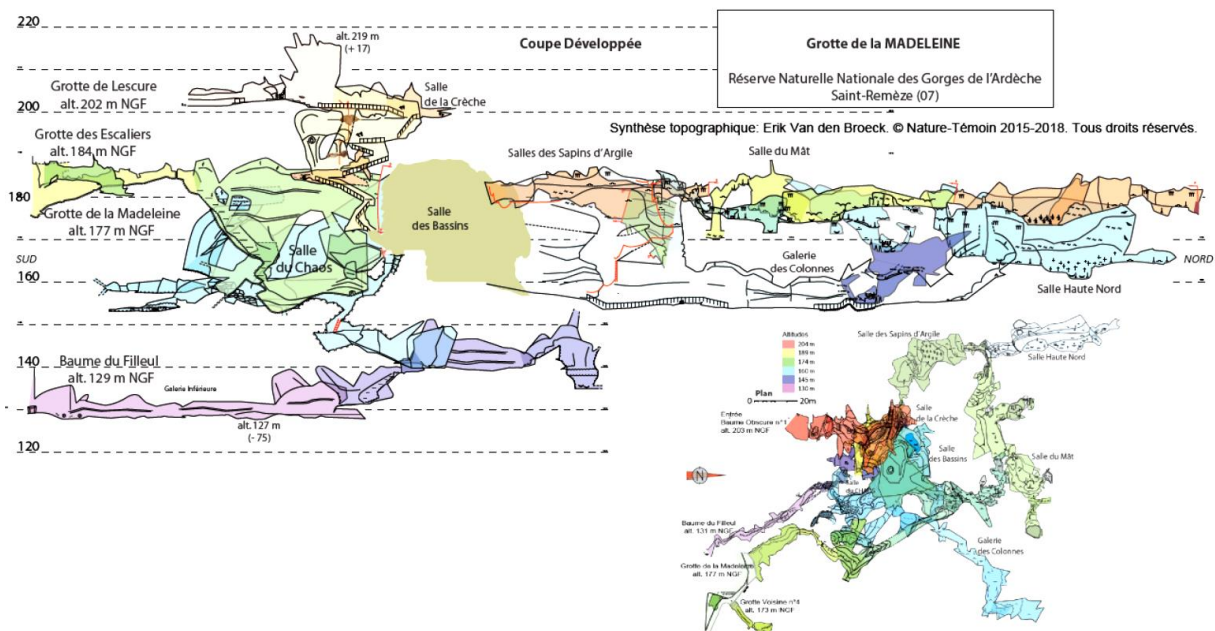


Figure 6 - Synthèse topographique de la Grotte de la Madeleine (Erik VAN DEN BROECK)  
Summarised survey of la Madeleine cave (Erik VAN DEN BROECK)

La grotte de la Madeleine (figure 6) étant de droit communal donc public, sa topographie peut être reproduite.

De par sa structure spatiale et son positionnement par rapport au canyon de l'Ardèche, la salle du Chaos de la grotte de la Madeleine peut se comparer à un cyclone (au sens technique du terme) auquel se rattache l'ensemble des galeries en amont (salles Haute Nord, des Sapins d'argile du Mât) qui configurent les arrivées de l'eau du karst. Les galeries en aval (galeries de Baume Lescure, de la Madeleine et Baume du Filleul) s'apparentent plutôt à des exutoires - pertes provoquant une compétition entre les masses d'eau karstique et celles de la rivière qui arrivent dans cette vaste enceinte étant donnée sa proximité avec le niveau de base local de l'époque.

## 5. Interprétation des résultats et discussion

A partir des résultats issus de ce cortège d'analyses géochimiques, plusieurs interprétations sont possibles et divers points de discussion peuvent être abordés.

*\*les processus d'altération physiques et chimiques mis en jeu :*

Les processus d'altération physiques mis en jeu sont nombreux : désagrégation mécanique, dislocation et retrait, tassement et dessiccation, ablation de la couverture par érosion aréolaire, corrosion, crypto-corrosion et crypto-altération. Des processus chimiques d'altération comme l'oxydoréduction/précipitation sont favorisés par la mise en solution des éléments de transition. L'agression chimique a cependant pu être ralentie si l'équilibre calco-carbonique des eaux d'infiltration est retardée.

La gradation dans ces différentes étapes du processus d'altération peut conduire jusqu'à la latérisation observée au Crétacé supérieur jusqu'à l'Eocène moyen. La fracturation et les déformations liées à la tectonique peuvent accélérer et amplifier le phénomène d'altération. Il

demeure cependant difficile de hiérarchiser ces évolutions et de déterminer les plus importantes et les plus fréquentes.

*\*les environnements les plus propices au développement du processus d'altération*

L'altération se produit dans différents types d'environnements qui se combinent :

- (i) à des conditions de dépôt et de sédimentation qui peuvent dépendre des cycles climatiques porteurs d'évènements anoxiques comme à l'Eocène inférieur et moyen.
- (ii) à la proximité ancienne d'une rivière qui peut avoir un rôle important et influencer sur le mélange d'eaux karstiques et de surface comme dans le cas de la grotte de la Madeleine.

Des environnements laguno-lacustres tels que ceux de l'Eocène supérieur ne sont pas propices à la production d'altérites contrairement aux dépôts marins carbonatés de l'Eocène moyen.

*\*les indicateurs d'altération les plus pertinents*

Les index d'altération sont significatifs de modifications des propriétés physico-chimiques des minéraux. Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est également un bon indicateur pour la détermination des différents groupes argileux. L'analyse de ces indicateurs est cohérente avec la production la plus importante d'altérites retrouvées dans le karst dans les formations de l'Eocène inférieur et moyen.

*\*le déplacement et le transport des altérites*

La provenance des altérites depuis la surface jusqu'au milieu souterrain témoigne de circulations anciennes soit par infiltration ou par transport paléofluviatile. Dans certains cas, la pluie a pu entraîner par gravité les altérites dans la zone saturée. La présence d'une nappe phréatique dont le rythme des variations piézométriques était soutenu a pu provoquer leur dispersion.

L'existence de drains préférentiels, vestiges de circulations anciennes dans le karst a également favorisé le transport des sédiments altéritiques. Leur provenance peut donc s'avérer utile pour comprendre les échanges actuels entre le karst et les rivières.

L'ensemble de ces interprétations dépend bien sûr du choix des zones de prélèvement qui peut paraître plus ou moins subjectif et de la représentativité des échantillons qui ne permet pas toujours d'avoir une vision analytique complète sur l'ensemble de la zone d'étude. Une analyse spatiale de la répartition géographique et géologique des formations altéritiques à l'aide d'un traitement géostatistique de la localisation des zones de prélèvements pourrait être une perspective intéressante.

## **Conclusion :**

Les différentes formes d'altération étudiées dans cet article se répartissent spatialement de façon complexe et inégale dans les cavités qui ont pu être totalement comblées à certaines périodes. Les propriétés hygroscopiques des argiles augmentent le volume des remplissages avec une teneur en eau capillaire d'environ 15% pour quelques dépôts analysés.

La désorganisation de la surface géographique, comme l'enfoncement des vallées, a provoqué des gradients hydrauliques privilégiant des axes d'écoulements préférentiels qui ont évacué graduellement mais aléatoirement les altérites surtout en période de hautes eaux avec une turbidité enregistrée aux exutoires lors des crues qui est très variable pour un débit relativement

identique. L'effet régressif du soutirage n'est pas retenu ici vu l'hétérogénéité des fracturations et de la répartition des comblements dans les paléokarsts. Ces dépôts détritiques dépendent ainsi des dynamiques hydrosédimentaires et des conditions environnementales et climatiques de ces époques.

Cette approche par la géochimie est complémentaire de l'analyse macro et micropaléontologique et des analyses granulométriques et minéralogiques des divers sédiments. Cependant, elle permet de proposer une datation qui demeure à préciser, des reliquats des paléo-couvertures conservés sur les surfaces d'aplanissement et dans leur encaissant. Sur la base des résultats obtenus, il apparaît que dès le Cénomanién, la plate-forme barrémo-aptienne a été coiffée par des affleurements détritiques et littoraux peu épais et de faible extension n'ayant cependant pas laissé de traces dans les hypogées visitées. Seules, les altérites de l'Eocène inférieur et moyen laissent leurs empreintes sur et dans le karst, les marnes de l'Eocène supérieur ne se conservant que dans les formes exokarstiques

Si l'on s'en réfère à l'épaisseur de 300 mètres de l'Eocène moyen du fossé d'Alès, ce manteau couvrait la totalité de l'aire étudiée avant de se soulever et de s'éroder sous l'effet des contraintes tectoniques de la phase paroxysmale compressive la fin du Bartonien et de l'Eocène supérieur. L'Oligocène a engendré l'ouverture du fossé d'Alès faisant basculer définitivement les massifs de la dent de Rez (726m.), du Mont Bouquet (629m.) et de Fons sur Lussan (472m.) et entraînant de facto leurs aquifères qui conservent encore les traces de ces sédiments terrigènes.

Si le canevas structural cassant s'est mis en place et s'est karstifié dès l'émersion de la plate-forme carbonatée barrémienne, la datation des différentes phases spéléogénétiques ne peut être définie par rapport à leur remplissage.

## **Remerciements :**

A Garcia D. et F. Gallice (Mines- St Etienne) pour les analyses géochimiques par ICP-AES, les discussions fructueuses et leurs remarques.

Aux spéléos du Groupement Associatif des Spéléologues d'Issirac, d'Orgnac et de La Bastide de Virac (G.A.S.O.I.L.) pour la récolte de nombreux échantillons aux cours de leurs pérégrinations en sous sol.

Enfin aux gestionnaires des grottes aménagées d'Orgnac, la Forestière, de la Madeleine et de la Salamandre pour leur accueil et l'intérêt qu'ils portent à ce travail.

## **Bibliographie :**

BASTIDE F. (2014) - Synthèse de l'évolution de la plateforme Urgonienne (Barrémien tardif à Aptien précoce) du Sud-Est de la France : Facies, micropaléontologie, géochimie, géométries, paléotectonique et géomodélisation. *Thèse de doctorat soutenue à l'université de Lausanne et à l'université de Grenoble*, 456p.

BILLAUD Y. (1979) : *Etude de la grotte de la Madeleine - plateau de St Remèze (07) - cadre général, morphologie, remplissage* - DEA 1979, Université de Lyon 1 - 57p.

BOUCHE A. (2011) - Contrôles paléoenvironnementaux, architecture sédimentaire et évolution diagénétique d'un système lacustre à salinité variable : le cas du Bassin d'Alès

(Priabonien, Sud de la France), *Université PAUL CEZANNE - Université de PROVENCE-École Doctorale Sciences de l'environnement d'AIXMARSEILLE*.58 p.

BRUXELLES L. (2001) - Reconstitution morphologique du Causse du Larzac : rôle des formations superficielles dans la morphogénèse karstique. *Karstologia n°38*, 25-40p

CAMUS H. (2003) - Vallée et réseaux karstique de la bordure carbonatée sud cévenole. Relation avec la surrection, le volcanisme et les paléoclimats. Thèse Doctorat, Université Bordeaux III, 692 p.

CHADELLE B., CAMUS H., 2018 - Étude morphokarstique de l'hydrosystème de la Cèze (30). Caractéristiques géométriques et karstologiques du réservoir Urgonien du plateau de Méjannes-le-Clap incisé par le canyon de la Cèze. *Rapport d'étude, ZABR-AERMC*, 162p

CRAMER, B. S., TOGGWEILER, J., WRIGHT, J., KATZ, M. and MILLER, K. (2009): Oceanoverturningsince the LateCretaceous: Inferencesfrom a new benthicforaminiferal isotope compilation, *Paleoceanography*, 24(4), 2009.

CRAMER, B. S., MILLER, K. G., BARRETT, P. J. and WRIGHT, J. D. (2011): LateCretaceous-Neogene trends in deepocean temperature and continental ice volume; reconciling records of benthicforaminiferal geochemistry ( $\delta$  O18 and Mg/Ca) withsealevelhistory, *Journal of Geophysical Research*, 116(C12), 2011.

DONNADIEU Y., PUCEAT E., MOIROUD M., GUILLOCHEAU F. et DECONINCK J.F. (2016). A better-ventilatedoceantriggered by LateCretaceous changes in continental configuration. *Nature Communications*, 7, Article number 10316. doi:10.1038/ncomms10316.

DÖRFLIGER N., FLEURY P., LE STRAT P., CAPAR L. (2008). Caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères carbonatés karstiques sous couverture. Méthodologie, synthèse bibliographique et synthèse géologique régionale. *Rapport final BRGM-RP-56980-*

GEOREPERES (2014): Les Agents d'érosion et formes de relief *georepere.e-monsite.com/medias/files/chap.-7*, 9p.

GOURDON-PLATEL N., DUBREUILH J. (1992) : Karsts et évolutions climatiques Presses Universitaires de Bordeaux, p. 449-460.

JOLIVET J., CHAPUIS H., RE-BAHUAUD J., GRAILLOT D., GUY B. et VAN DEN BROECK E. (2017): Évolution paléogéographique et karstogénèse du bassin d'Issirac (Gard, France) du Crétacé supérieur au Miocène inférieur. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01612184>

LELEU S., GHIENNE J. F. and MANATSCHAL G. (2009): Alluvial fan development and morphotectonic evolution in response to contractional fault reactivation (Late Cretaceous–Palaeocene), Provence, France, *Basin Research*, 21, 157-187, 2009.

LETTERON Alexandre, FOURNIER François, HAMON Youri, VILLIER Loïc, MARGEREL Jean-Pierre, BOUCHE Alexandre , FEIST Monique, JOSEPH Philippe (2017): Multi-proxy paleoenvironmental reconstruction of saline lake carbonates: Paleoclimatic and

paleogeographic implications (Priabonian-Rupelian), Issirac Basin, SE France) *Sedimentary Geology* 358 (2017) 97–120

MASSE J.P. (1989): Contribution à l'étude de l'Urgonien (Barrémien - Bédoulien) des Monts de Vaucluse et du Luberon, *BRGM*, 45p.

MAURIZOT P, QUESNEL F., SEVIN B., WYNS R. : (2014): Les sols et altérites comme ressources minérales, *Publications du BRGM*, article.

MOUTTE J. (2018) Analyse par Spectrométrie d'émission Plasma (ICP-AES), <http://www.emse.fr/~moutte/frplasma/correct.htm>

NESBITT, H .W. and YOUNG, G.M., (1982): Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 199, 715-717

POTDEVIN J.L., MARQUER D. (1987) : Méthode de quantification des transferts de matière par les fluides dans les roches métamorphiques déformées - *Géodynamica Acta (Paris)* 1987,1,3, p.193 - 206.

SALOMON J.N. (2006) : Les Karst couverts Précis de Karstologie, *Presses Universitaires de Bordeaux*, p. 179-203

ZACHOS J. C., DICKENS G. R. and ZEEBE R. E. (2008): An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics, *Nature*, 451, 279-283, 2008.