GEOLOGIE

LES CALCITES DE FONTAINEBLEAU : OCCURRENCE ET GENÈSE

Par Médard THIRY

Citation proposée : THIRY M., 2013 (2016). Les Calcites de Fontainebleau : occurrence et genèse. *Bull. Ass. Natur. Vallée Loing*, **89** (3) : 111-133.

Mots-clés : Calcite, Datation, Pléistocène, Paléoclimat, Pergélisol, Glaciaire, Fontainebleau, Seine-et-Marne, Ile-de-France.

Résumé : Les Calcites de Fontainebleau et plus généralement les cristallisations de calcite au sein des sables (calcites sableuses s.l.) n'ont jamais fait l'objet d'une étude « géologique » pour expliquer leur formation. La description des calcites sableuses (sphérolithes en amas et groupements de cristaux) dans le Massif de Fontainebleau et aux alentours permet de proposer un modèle hydrologique pour leur formation-précipitation. Par ailleurs, les datations radiochronologiques ont montré qu'elles sont liées aux dernières glaciations et qu'elles ont précipité lors des périodes de refroidissement. Ce sont des calcites qui se sont formées par réchauffement des eaux d'infiltration au contact des eaux plus chaudes de la nappe. Elles apparaissent comme des traceurs prometteurs pour suivre l'extension des pergélisols et repérer d'anciennes positions de la nappe phréatique, et ainsi servir de points d'ancrages pour suivre l'évolution des paléopaysages quaternaires.

Introduction

Les Calcites de Belle-Croix[1] ont eu les honneurs des toutes premières publications géologiques (**LASSONE, 1775, 1777**). Toute collection minéralogique qui se respecte se doit d'en avoir un exemplaire. Le web permet de se rendre compte que tous les musées américains ont ce « *French super classic of acute rhombohedral crystals* ». Les gisements bellifontains sont apparemment uniques. Il existe peu de gisements de calcite qui se développent dans des sables et aucun ne présente des cristaux de cette taille et avec des formes aussi parfaites. Et couronnement de la gloire, les calcites ont eu droit à un timbre poste en 1986 !

C'est à **DE LASSONE** (1717-1788), médecin de MARIE-ANTOINETTE et de LOUIS XVI, et ami de FONTENELLE, d'ALEMBERT et de BUFFON, que reviennent les premières publications sur les Calcites de Belle-Croix avec trois notes à l'Académie Royale des Sciences. **LASSONE** (**1777**) met en équivalence les calcites en rhombes et les boules de calcite et précise qu'elles sont formées de 5 parties de sable et 3 de spath. L'essentiel de ce qui était connu il y a quelques années était dit : la composition et les 2 variétés, même que la variété en boules a été complètement oubliée par la suite. Plus tard, **ROMÉ DE L'ISLE** (**1783**) mentionne « les grés calcaréo-quartzeux des environs de Nemours et Fontainebleau » dans le tome premier de son mémoire de cristallographie.

CUVIER & BRONGNIART (**1811**) ont proposé une origine superficielle pour les calcites : hypothèse révolutionnaire pour cette époque où tout ce qui était cristallin et pur était interprété comme endogène ou hydrothermal, résultant d'émanations chaudes venant de la profondeur. « *Le calcaire d'eau douce de Belle-Croix repose sur une marne calcaire jaunâtre. Nous croyons pouvoir attribuer aux infiltrations calcaires de ce sol supérieur les cristaux de grès calcaire qu'on trouve si abondamment dans une carrière de ce lieu* ». Les Calcites de Fontainebleau sont post-dépôt ! Il faut encore mentionner qu'est adjointe au mémoire une très belle carte « géognostique » colorisée avec alignements dunaires marqués. Enfin, **DELESSE** (**1853**) précise que la composition des Calcites de Fontainebleau est variable : calcite 43-17% et sable 57-83%.

[1] Par la suite, nous réserverons la dénomination « Calcites de Fontainebleau » pour les cristaux de calcite sableuse contenue dans les Sables de Fontainebleau ; toutes les autres variétés, qu'elles présentent des formes cristallines ou non, seront appelées calcites sableuses avec éventuellement un adjectif qualificatif.

Walther (1924) considère que ces cristaux de calcite, comme le gypse des roses des sables, se sont formées sous l'effet de l'évaporation dans des environnements désertiques.

Pas ou peu de publications récentes ont été consacrées aux Calcites de Fontainebleau, sinon une note de revue historique par Gaudant (2004). Les Calcites de Fontainebleau sont une curiosité minéralogique et effectivement ce sont les collectionneurs qui sont présents et font du travail. Les quelques références bibliographiques récentes se trouvent dans des publications « grises » non « rankées » (Billhot & *al.*, 1986 ; Brousse, 2003 ; Neutkens & *al.*, 2014). Le web a aussi pris le relais avec des informations sur les calcites sableuses de Fontainebleau, mais aussi ailleurs en France, en Europe et dans le monde (Löffler, 1999, 2012). Toutes ces références sont riches en informations.

Habitus et composition

Les calcites sableuses présentent deux grandes variétés morphologiques : des cristaux bien développés et des concrétions qui ne présentent pas de morphologie cristalline. Des termes de passage existent entre ces deux variétés. De plus, nous adjoignons ici aux calcites sableuses des calcites translucides toutes différentes, mais qui sont quelques fois associées aux calcites sableuses et leur sont probablement génétiquement liées.

Calcite sableuse en cristaux

Les cristaux de calcite sableuse, et en particulier les Calcites de Fontainebleau, ont toujours la forme du rhomboèdre dit inverse, de notation Miller/Bravais $(022\bar{1})$ dans un système hexagonal à quatre axes cristallographiques (Lacroix, 1901), (Fig. 1). Les cristaux sont quelquefois isolés, sous forme de rhomboèdres uniques parfaits, ou interpénétrés par d'autres individus. Dans le cas général, ils forment des groupements (cristallarias) qui peuvent atteindre plusieurs décimètres (Fig. 2A & 2B) avec des cristaux interpénétrés parfaitement nets. Les cristaux peuvent être à axes plus ou moins parallèles, donnant des dispositions en «crête de coq», ou présenter des groupements organisés radialement en «gerbe», ou former des enchevêtrements sans régularité. Souvent les grands cristaux sont recouverts par des cristaux plus petits (Fig. 2A). Les échantillons présents en surface, au contact avec la pluie, ont des faces ternes et s'arrondissent par dissolution des arrêtes.



Fig. 1 : Rhomboèdre inverse, habitus caractéristique des Calcites de Fontainebleau.

Calcite sableuse sphérolithique

Des sphérolithes de calcite sableuse sont fréquents dans les sables blancs, associés ou non à des cristallarias de calcite sableuse. Leur taille est variable, allant de concrétions décimétriques à des granules millimétriques (Fig. 2C). Les sphérolithes peuvent être isolés au sein des sables ou au contraire être coalescents, ou former des concrétions plus grosses qui englobent des sphérolithes primaires plus petits. D'autres sphérolithes montrent des granules secondaires plus petits qui se développent à leur surface (Fig. 2D). Les sphérolithes les plus petits (centimétriques) ne montrent généralement aucune structure cristalline, alors que les sphérolithes plus grands (2-5 centimètres de diamètre) sont souvent hérissés de pointes de rhomboèdre inverse à leur surface. Il y a un continuum entre les sphérolithes à pointes de rhomboèdre et les cristallarias à cristaux mieux individualisés.

Grès cloutés

En carrière, la dalle de grès supérieure supporte quelque fois de petits granules de calcite. Ces granules sont toujours disposés sur les surfaces supérieures peu inclinées, à l'exclusion des zones plus pentées par où s'écoulent les eaux d'infiltration (Fig. 2E). La disposition géotropique de ces concrétions indique clairement qu'elles sont liées à la stagnation des eaux au-dessus des dalles imperméables. Ce sont les grès cloutés signalés par Janet (1894).

« Gogottes » ou poupées calcaires

Le terme gogotte appliqué aux concrétions gréseuses des sables du Bassin de Paris a été lancé par Claude Guillemin en référence à des personnages malveillants transformés en gros cailloux de forme concrétionnée et anthropomorphe dans un conte pour enfants (Guillemin, 1978). Depuis, le mot est devenu très « populaire », repris par les géologues et les collectionneurs, et appliqué indistinctement à toute forme contournée qu'elle soit siliceuse ou carbonatée. On peut appliquer le terme gogotte aux plus grandes concrétions cal-

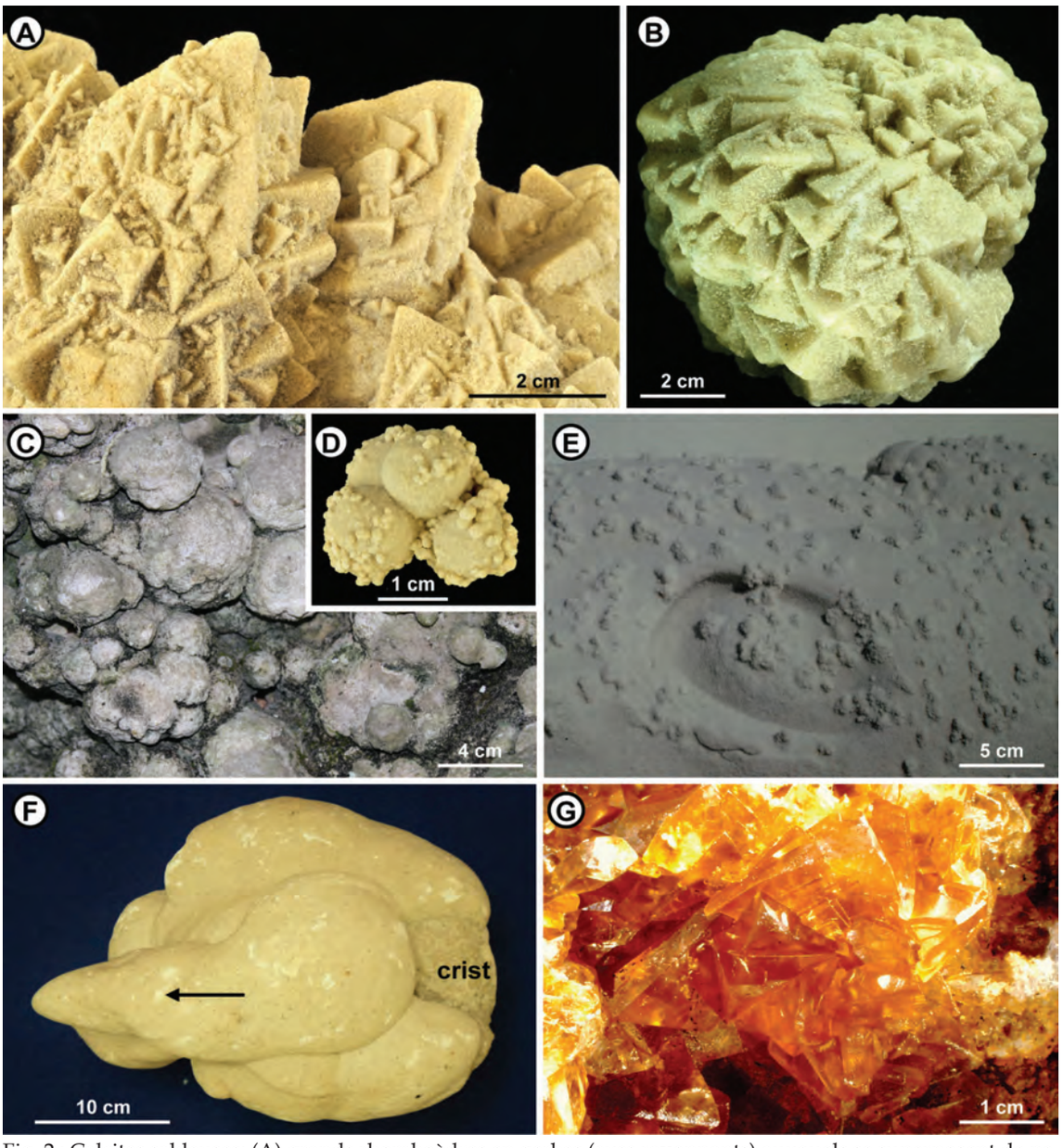


Fig. 2 : Calcites sableuses: (A) grands rhomboèdres en gerbes (axes rayonnants) auxquels se superposent de petites pointes de rhomboèdre (Puiselet, 77), échant. 8609 ; (B) cristallaria à rhomboèdres enchevêtrés (La Garenne, Darvault, 77), échant. 8931 ; (C) sphérolithes coalescents (Roche à Boule, Montigny/Loing, 77) ; (D) sphérolithes avec petits sphérolithes secondaires (carrière Bonnevault, Larchant, 77) ; (E) grès «clouté» de petits granules de calcite (carrière des Gondonnières, Larchant, 77), idem échant. 8943 ; (F) poupée calcaire englobant une cristallaria à pointes de rhomboèdre (crist) ; la disposition des concrétions successives et leur allongement donne le sens de l'écoulement de l'eau (flèche) qui a précipité la calcite, (carrière des Gondonnières, Larchant, 77) ; (G) cristaux de calcite limpide (carrière des Gondonnières, Larchant, 77), échant. 8787. Les numéros sont ceux des échantillons qui ont été datés (Tab. I).
Clichés : M. Thiry, sauf (B) Ph. Le Caer (Mines-ParisTech) et (G) M. Berger (Mines-ParisTech).

caires, décimétriques à métriques, avec formes coalescentes et multilobées. Le terme poupée convient mieux aux concrétions plus petites et a l'avantage d'être reconnu et compris par les géologues hors du Bassin de Paris et à l'étranger. Ces concrétions englobent souvent des cristallarias de calcite sableuse (Fig. 2F).

Cristaux de calcite translucide

Dans plusieurs gisements, des cristaux de calcite limpide, couleur miel, de taille centimétrique et d'habitus rhomboèdre inverse (Fig. 2G) sont associés aux calcites sableuses en cristaux. Ces calcites de type « géodique » se sont formées dans des vides résultant de l'altération de niveaux

fossilifères. Certaines remplissent l'intérieur de coquilles.

Par ailleurs, les calcaires lacustres régionaux, calcaires de Brie, de Beauce et de Château-Landon, montrent souvent des cavités de dissolution karstique, centi- à décimétriques, tapissées de cristaux hyalins de calcite à habitus rhomboèdre inverse, comme l'a déjà signalé Lacroix (1901). Ces calcites géodiques sont classiquement interprétées comme synsédimentaires, formées dans le bassin, suite à des émersions à l'origine de dissolutions karstiques (Freytet & Plaziat, 1978 ; Alonzo-Zarza, 2003). L'habitus en rhomboèdre inverse les fait rapprocher des calcites sableuses. Il faut en tout cas se poser la question et vérifier si ces deux types de calcite *a priori* très différents par leur milieu de formation n'ont pas une origine similaire.

Teneur en calcite

La composition des calcites sableuses est variable. Les teneurs en calcite des cristaux sont comprises entre 20 et 50%, avec une moyenne de 30% établie sur 48 échantillons. Les valeurs entre 30 et 35% correspondent à la porosité d'un sable peu ou non compacté, comme le Sable de Fontainebleau. Les teneurs en calcite supérieurs à 35% correspondraient à des sables qui contenaient des carbonates primaires (coquilles par exemple) et qui on été altérés avant la précipitation de la calcite sableuse. Les teneurs en calcite inférieures à 30-25% indiqueraient une porosité résiduelle relative à des domaines peu ou pas cimentés, ou altérés.

Les calcites sableuses en sphérolithes ont des teneurs en calcite plus faibles que celles en cristaux. Leurs teneurs en calcite sont comprises entre 11 et 30%, avec une moyenne de 20% établie sur 27 échantillons. Ces teneurs plus faibles en calcite correspondent à une cimentation moins dense, ménageant une porosité secondaire.

Pétrographie

Les lames minces taillées dans les cristaux montrent des grains de quartz arrondis typiques des Sables de Fontainebleau, sans auréole de nourrissage, englobés dans une plage de calcite monocristalline (structure poecilitique) (Fig. 3). Les grands cristaux présentent ainsi un ciment constitué d'un seul cristal de calcite pour toute la surface de la lame mince. Les concrétions à petits cristaux et les concrétions globulaires montrent la même structure poecilitique, simplement avec des cristaux plus petits, voire un simple ciment de sparite.

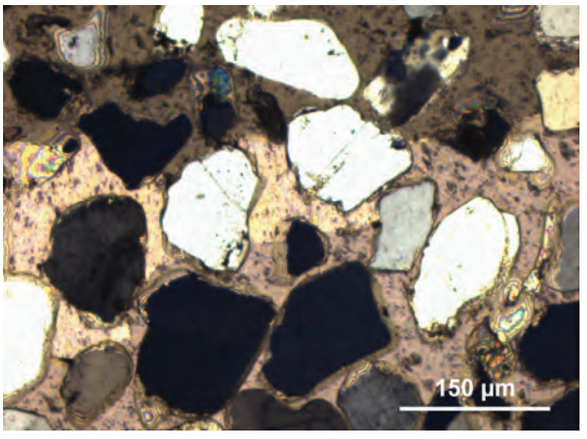


Fig. 3 : Lame mince montrant les grains de quartz cimentés par de la calcite. Chaque plage de couleur correspond à un cristal unique. Lumière analysée.

Les amas de sphérolithes

Si les sphérolithes de calcite sableuse ont été mentionnés dès les premières publications relatives aux Calcites de Belle-Croix (Lassone, 1777) elles n'ont plus fait l'objet d'une publication depuis. Les affleurements de ces grès calcaires sont pourtant manifestes et pour certains signalés comme rocher remarquable sur la carte topographique. Nous ferons la description de ces sites pour en dégager les caractères texturaux et structuraux qui permettent de cerner leur formation.

« Le Carrosse » – Fontainebleau (77)

Dans le sud de la forêt, sur le versant nord du Haut-Mont (parcelle 521), se dresse à mi-pente un rocher de 4-5 mètres de hauteur qui montre de beaux sphérolithes de calcite sableuse. Le sommet du rocher est à la même hauteur et à environ 30 mètres de distance d'une dalle de grès quartzite qui a été exploitée. Il n'est pas possible de préciser les rapports mutuels entre les 2 cimentations du sable. Une succession de faciès peut être reconnue (Fig. 4) :

- le sommet du rocher est formé d'un grès calcaire à vides vermiculés millimétriques et cavités centimétriques aux contours irréguliers. Le grès est recoupé par des puits de dissolution karstique de 5 à 30 centimètres de diamètre (Fig. 5A). Les puits sont souvent obstrués par du sable et des végétaux, mais certains sont vides et l'un d'entre eux a près de 1 m de profondeur. Les conduits sont anastomosés et branchus, avec des passages horizontaux ;
- à mi-hauteur du rocher, apparaissent des niveaux jaunâtres de 2-15 centimètres d'épaisseur et d'inclinaisons variées (vers le nord, le sud-ouest et l'ouest). Ce sont des grès calcaires rubanés montrant de grands clivages de calcite

sableuse ;

➢ la base du rocher est presque exclusivement constituée de sphérolithes coalescents de calcite sableuse (1 à 5 centimètres de diamètre), (Fig. 5B). Les sphérolithes sont cimentés par des bandes de grès calcaire blanc d'épaisseur millimétrique et d'inclinaisons entrecroisées. En base de coupe les sphérolithes diminuent de taille et sont «libres» au sein du sable blanc.

Un second rocher existe au nord de la « Route du Carrosse ». Il est composé de sphérolithes plus gros (2-10 centimètres de diamètre), parfois « libres » dans le sable, avec beaux rhomboèdres de calcite (2-4 millimètres) en surface (Fig. 5C). Ces sphérolithes (ou cristallarias ?) montrent un cortex de 3-5 millimètres, constitué de rhomboèdres alors que l'intérieur ne présente pas de grands cristaux (Fig. 5D). Des raies ferrugineuses de couleur ocre traversent les cristallarias et sont donc antérieures à leur cristallisation

Le grès calcaire présente un fort géotropisme, avec facies massif en tête, structures laminées entrecroisées dans la partie moyenne et des sphérolithes « libres » au sein du sable à la base de la

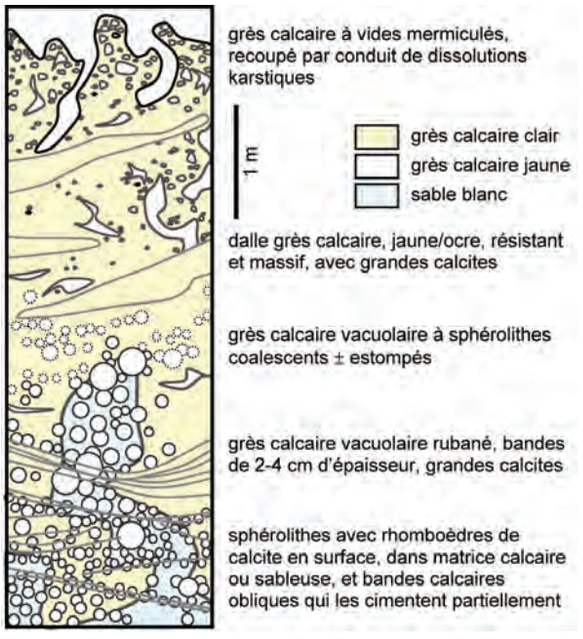


Fig. 4 : Coupe du rocher « Le Carrosse ». Le grès calcaire est massif en tête, des bandes de grès enrichies en oxydes de fer sont individualisées au milieu et la cimentation de l'ensemble diminue vers la base.

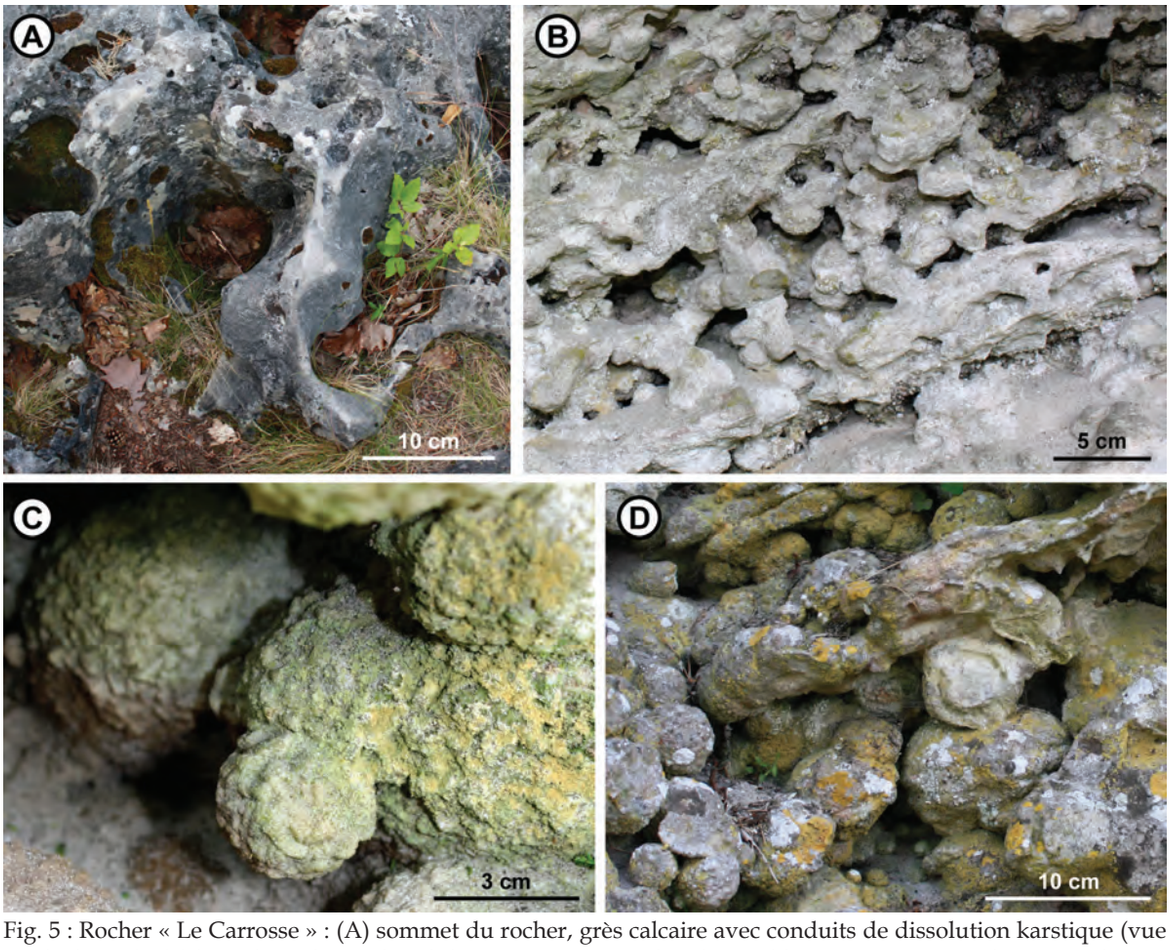


Fig. 5 : Rocher « Le Carrosse » : (A) sommet du rocher, grès calcaire avec conduits de dissolution karstique (vue par le dessus) ; (B) base du rocher, sphérolithes centimétriques de calcite sableuse, cimentés par des raies calcaires obliques ; (C) rocher « latéral », sphérolithes hérissés de pointes de rhomboèdre, au sein du sable non cimenté ; (D) rocher « latéral », sphérolithes anastomosés et zonés. Clichés : M. Thiry.

coupe. Ces structures résultent de la dynamique des écoulements et de l'évolution des équilibres géochimiques des eaux d'infiltration. Les structures laminées entrecroisées indiquent des écoulements en zone saturée. La calcite précipite le long de ces structures au fur et à mesure que l'eau s'infiltre. La calcite des rhomboèdres du cortex a probablement précipité dans des conditions plus proches de l'équilibre que la calcite sans habitus cristallin marqué du cœur des sphérolithes.

Les dissolutions karstiques en tête recoupent les différents faciès du grès calcaire, elles sont tardives et sont probablement encore actives actuellement.

« Roche à Boule » – Montigny-sur-Loing (77)

La « Roche à Boule » est situé à environ 1,5 kilomètre au sud-est du « Carrosse ». C'est un groupement de rochers massifs et irréguliers qui émergent du sable à l'intérieur d'une propriété clôturée. Tout à côté, des amas de sphérolithes coalescents sont visibles dans d'anciennes exploitations de sable en limite de la forêt domaniale (au sud de la parcelle 547).

L'affleurement principal est constitué de 3 rochers, chacun d'une surface d'environ 1 m^2. Les sphérolithes sont coalescents, de taille relativement régulière, de 1 à 4 centimètres de diamètre. Des zones de croissance se distinguent souvent. En revanche, très peu de formes rhomboédriques sont visibles et sont émoussées par altération. Il y a aussi relativement peu d'organisation d'ensemble à l'échelle de ces petits affleurements. La tête des rochers montre une structure plus cimentée et quelques figures de dissolution (Fig. 6A). Les petits sphérolithes initiaux sont souvent agglomérés dans un sphérolithe plus grand. La base des rochers est moins cimentée, avec des sphérolithes « libres » au sein du sable blanc (Fig. 6B). Localement, la taille des sphérolithes souligne des organisations obliques. D'autres faciès peuvent être reconnus dans les déblais de l'exploitation. Il a en particulier été trouvé une plaque, de 60 x 25 x 5 centimètres, formée à sa partie supérieure de sphérolithes d'environ 3 centimètres de diamètre, complètement soudés, et à sa partie inférieure de granules d'environ 0,4 centimètre de diamètre formant des « grappes » aérées. La plaque indique clairement la relation avec un niveau de nappe (locale et/ou perchée ?) et un géotropisme vertical.

A quelques 200 mètres au sud-est, un bloc d'environ 1/4 m^3 de grès calcaire, et des petits blocs à boules jonchent le fond d'une ancienne carrière partiellement remblayée. Les boules atteignent 20 centimètres de diamètre. Le bloc montre une disposition horizontale des boules et de belles organisations concentriques avec enveloppes successives d'environ 1 centimètre d'épaisseur (Fig. 6C). On n'y distingue pas de forme rhomboédrique. Les stratifications primaires des sables transparaissent en travers des sphérolithes. L'ensemble des pointements de calcite sableuse de ce secteur s'étend sur environ 250 mètres.

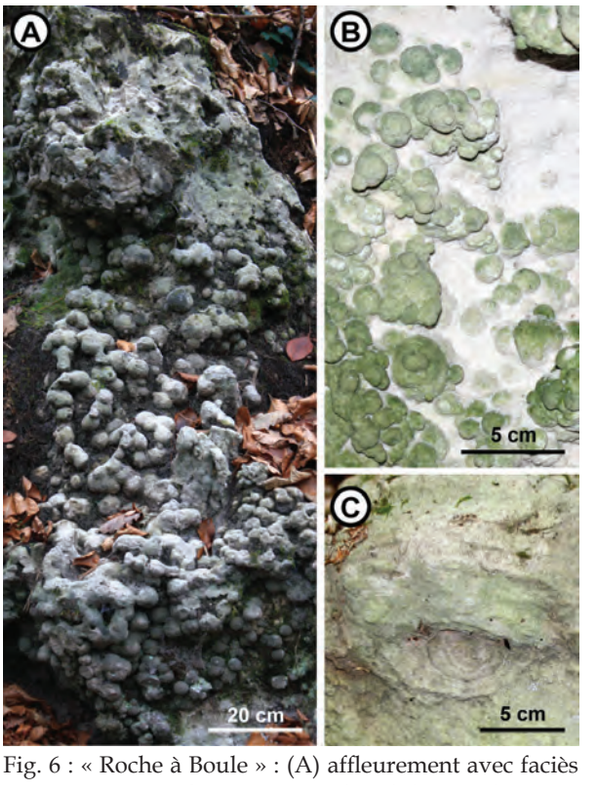


Fig. 6 : « Roche à Boule » : (A) affleurement avec faciès cimenté et massif en tête et sphérolithes coalescents, peu cimentés, qui forment le corps de l'affleurement ; (B) sphérolithes « composites » qui englobent plusieurs concrétions plus petites « libres » dans le sable blanc ; (C) structure concentrique à couches multiples dans un gros sphérolithe décimétrique. Clichés : M. Thiry.

« Cuvier Châtillon » – Fontainebleau (77)

Des grès calcaires à sphérolithes de calcite sableuse affleurent le long de la Route du « Cuvier Chatillon » dans la descente des « Monts de Fay » vers le « Bas Cuvier » (parcelle 881). Les rochers se situent à la limite des Sables de Fontainebleau et du Calcaire d'Etampes (Fig. 7). Une douzaine de rochers, de volumes compris entre 20 et 250 m^3, tapissent le vallon sur environ 150 mètres. Le Calcaire d'Etampes forme un petit escarpement sur le rebord nord du vallon. Sous le calcaire, les sables sont oxydés et contiennent par place des sphérolithes de couleur ocre avec pointes de rhomboèdre. Les rochers sont d'aspect vacuolaire, formés par la coalescence plus ou moins serrée de sphérolithes de 4 à 10 centimètres de diamètre.

Les sphérolithes sont altérés en surface et il est rare d'y distinguer des pointes de rhomboèdre. En revanche, ils montrent souvent une structure zonée. Les rochers sont dispersés tout au long du vallon et il n'est pas possible de se faire une idée de leur continuité ni de leur enracinement (Fig. 7). L'espace entre les rochers pouvait être occupé soit par des sphérolithes non cimentés ou par du sable. Comme il n'y a pas d'amoncellement de sphérolithes sur les pentes du vallon, on peut imaginer que les rochers correspondent à des piliers, qui s'enracinent dans le sable jusqu'à une certaine profondeur et passent à des sphérolithes non cimentés en profondeur comme dans le cas du « Rocher Carrosse » et de la « Roche à Boule ».

A quelques 150 mètres au nord-nord-ouest, en avant des carrières de grès de la Route Tournante du « Cuvier Chatillon », des amas de sphérolithes de calcite sableuse sont imbriqués avec le grès quartzite à structures de dissolution pseudokarstique (Thiry & *al.*, 1984) (Fig. 7). Plusieurs rochers sur le rebord de l'escarpement naturel montrent des sphérolithes de calcite sableuse, de 0,4 à 2 centimètres de diamètre, qui prennent en écharpe le Calcaire d'Etampes de la couverture, remplissent les morphologies pseudokarstiques du grès quartzite et pénètrent les sables sous-jacents sur au moins 2 mètres de profondeur (Fig. 8).

Les sphérolithes de ces derniers amas sont plus petits que ceux des grands rochers, situés au sud-sud-est, décrits précédemment. Néanmoins, ils montrent une augmentation de taille vers la profondeur, passant de sphérolithes d'environ 0,5 centimètre au-dessus des grès à des sphérolithes d'environ 2 centimètres de diamètre dans les sables sous la dalle de grès. On peut faire l'hypothèse que les amas à gros sphérolithes au sud-sud-est correspondent à des faciès profonds dans la continuité d'amas à sphérolithes plus petits.

Les calcites sableuses sont plus jeunes que le grès quartzite et les dissolutions « pseudokarstiques », qui sont elles-mêmes intervenues après que la dalle de grès ait été portée au-dessus du niveau de la nappe phréatique.

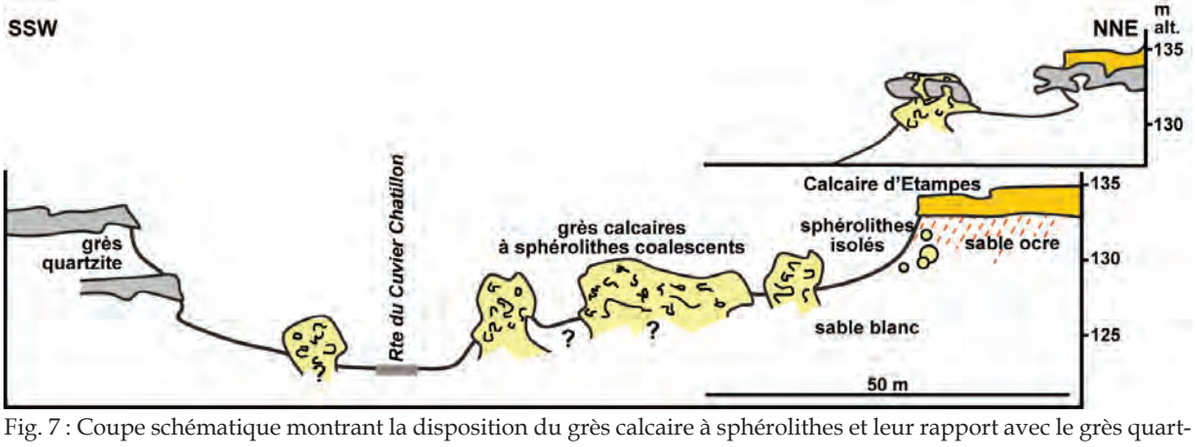


Fig. 7 : Coupe schématique montrant la disposition du grès calcaire à sphérolithes et leur rapport avec le grès quartzite dans le vallon de la Route du « Cuvier Chatillon» .



Fig. 8 : Ancienne carrière Route du « Cuvier Chatillon » : grès quartzite à morphologies de dissolutions pseudokarstiques, infiltrées et cimentées par des calcites sableuses sphérolithiques. Si : grès quartzite, Ca : grès calcaire. Cliché : M. Thiry.

« La Roche Éponge » – Fontainebleau (77)

Au temps des ginguettes en forêt, « la Roche Éponge » était l'attraction touristique la plus populaire. Sa curiosité résidait dans ses formes étranges et avait été nommée « Roche Éponge, le Madrépore, le Polypier, la Morille, l'Ossuaire et La Sans-Pareille, la roche du Cinq-Mai » (Dénecourt, 1868).

« La Roche Éponge » est formée d'un grès calcaire. Son aspect étrange est dû à son altération par dissolution de la calcite du ciment par les eaux d'infiltration. Les puits karstiques de diamètre décimétriques sont quasi coalescents, donnant l'aspect d'une gigantesque éponge (Fig. 9 et 10A). Ces morphologies sont similaires à celles du sommet du rocher « Le Carrosse ».

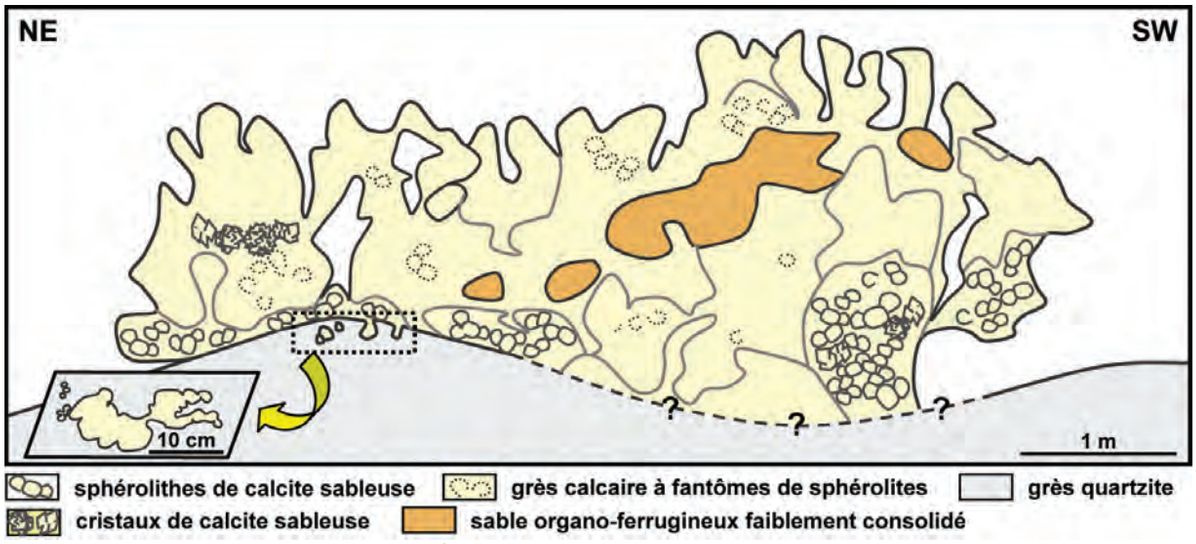


Fig. 9 : Coupe schématique de « la Roche Éponge ». Elle est formée d'un grès calcaire percé par de nombreux puits de dissolution qui lui confèrent son aspect singulier. Elle repose sur une dalle de grès quartzite et le contact montre l'inclusion de sphérolithes dans le grès quartzite. L'encart de la figure montre ce contact vu en plan par le dessus.

Le grès calcaire est formé de sphérolithes dont on distingue les fantômes sur les parois des puits de dissolution. Des sphérolithes de calcite sableuse bien distincts forment un niveau quasi continu à la base de la roche et sont bien visibles dans les parties en surplomb (Fig. 10A). Le dégagement des sphérolithes indique qu'ils étaient contenus dans du sable non cimenté, érodé à l'affleurement. Les sphérolithes sont cimentés entre eux par des lamines obliques de calcite sableuse (Fig. 10B). Les blocs isolés disposés autour de la roche montrent de beaux sphérolithes coalescents avec couronne de rhomboèdres de calcite (Fig. 11).

La roche montre aussi des masses brunes, formées de sable ferrugineux riche en matière organique et très peu consolidé (Fig. 10A). Ces sables remplissent des conduits subcirculaires qui correspondent à d'anciens conduits de dissolution.

Enfin, la roche repose directement sur une dalle de grès quartzite, exempte de calcite, qui apparaît tout autour du promontoire de la roche. Ce sont ces grès qui ont été exploités sur de grandes surfaces dans ce secteur. Le contact direct est visible dans la partie sud-est du rocher et montre des sphérolithes de calcite sableuse inclus (circonscrits) dans le grès quartzite (encart Fig. 9). En revanche, on ne peut pas assurer que la dalle de

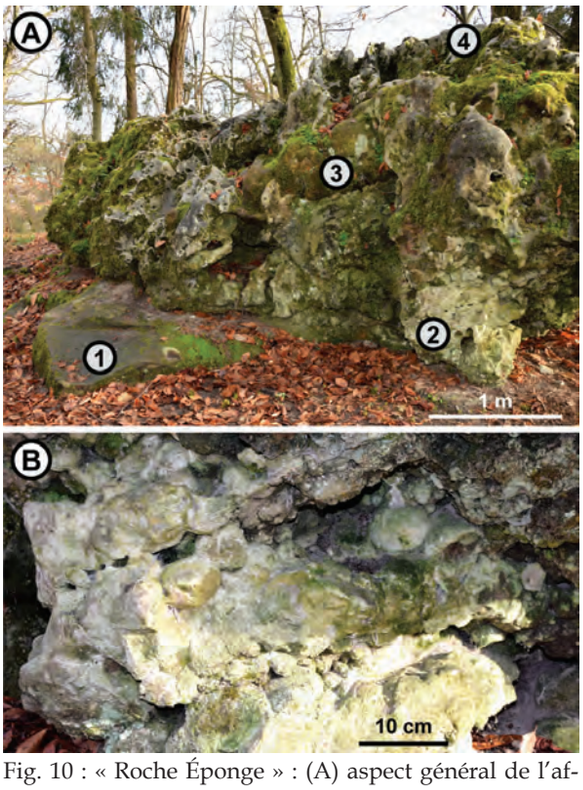


Fig. 10 : « Roche Éponge » : (A) aspect général de l'affleurement, (1) grès quartzitique, (2) sphérolithes coalescents, (3) sable brun en remplissage de conduit, (4) puits de dissolution karstique ; (B) sphérolithes de calcite sableuse disposés selon des plans inclinés.
Clichés : M. Thiry.

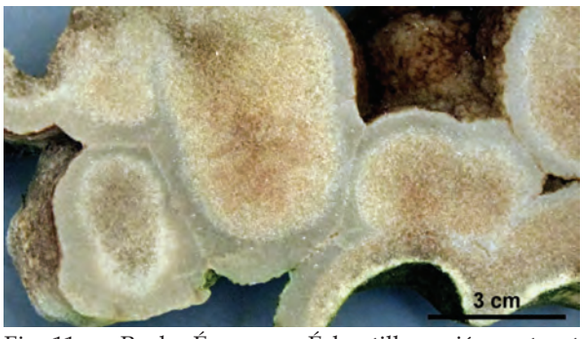


Fig. 11 : « Roche Éponge ». Échantillon scié montrant le cœur gréseux et brunâtre des sphérolithes avec un cortex de compact formé de rhomboèdres pointant vers l'extérieur.

grès soit continue sous toute la roche. En effet, les puits de dissolution indiquent qu'il y a drainage vers la profondeur. Il est donc vraisemblable que la dalle de grès soit interrompue sous la roche.

Le haut de la « Roche Éponge » est légèrement en contre-bas du sommet de l'épaisse dalle de grès qui forme l'ancien front de taille au sud-est.

Un second affleurement de grès à sphérolithes de calcite sableuse est visible à la grotte aux visages à quelques 100 mètres au nord-ouest de la « Roche Éponge ». Le grès de cette grotte est de cimentation très variable allant d'un grès friable sous la main à un grès quartzite très dur. L'affleurement de la grotte et les blocs abattus à l'arrière de la grotte montrent que le grès quartzite surmonte le grès calcaire et inclut des sphérolithes calcitiques.

Les grès à sphérolithes de calcite sableuse du secteur de la « Roche Éponge » présentent des caractères comparables à ceux des autres occurrences décrites : cimentation plus aboutie et compacte en tête, faciès moins dense à sphérolithes individualisés vers la base de la coupe, et passées à cristallarias. La particularité de cet affleurement est dans sa relation avec le grès quartzite. Alors que le grès calcaire du « Cuvier Chatillon » est postérieur au grès quartzite, et même à l'altération pseudokarstique de celui-ci, ici le grès quartzite inclut des sphérolithes de calcite sableuse qui apparaissent donc antérieurs au grès quartzite.

L'altération karstique de la roche est tardive et se surimpose aux amas de sphérolithes. On y distingue une première phase avec remplissage des conduits par des matériaux organo-ferrugineux, comparables aux alios des sols podzoliques, qui existaient probablement au-dessus de la roche à l'époque de cette altération. Une seconde altération est à l'origine des formes étranges de la roche et ne montre pas de remplissage ferrugineux des conduits. Elle est probablement intervenue plus tard alors que les sols podzoliques avaient été érodés et la roche mise à nue.

« Béorlots » – Fontainebleau (77)

Dans le secteur des « Béorlots » affleurent divers grès calcaires. Sont décrits ici des faciès disposés parcelle 654, dans un petit vallon à l'ouest du croisement de la Route de la Gorge aux Archers et de la Route de la Bourse (Fig. 12).

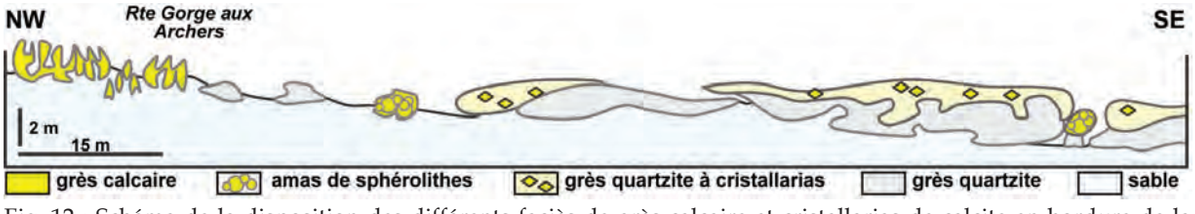


Fig. 12 : Schéma de la disposition des différents faciès de grès calcaire et cristallarias de calcite en bordure de la platière des « Béorlots ».

La platière au nord de la route est parsemée de blocs de grès calcaires à structures verticales qui correspondent à des cimentations columnaires à lamines gréseuses emboitées et encapuchonnées à la manière de spéléothèmes, souvent recoupées par des dissolutions karstiques. Au sud de la route, à l'entrée du vallon sont disposés plusieurs blocs de grès calcaire, d'aspect hétérogène, formés de sphérolithes coalescents de 2 à 10 centimètres de diamètre, avec une couche corticale de rhomboèdres pointant vers l'extérieur. L'escarpement gréseux qui borde le vallon est formé de deux faciès de grès superposés : un grès quartzite inférieur massif et homogène qui montre des morphologies en dômes et creux ; un grès quartzite supérieur, plus tendre contenant de nombreuses cristallarias de calcite, de 2 à 20 centimètres de diamètre. Le grès supérieur recouvre, encapuchonne et s'enfonce dans les « puits » non cimentés du grès inférieur (Fig. 13). Il y a clairement 2 épisodes de silicification qui se suivent et dont la dernière inclus des calcites sableuses. Localement se trouvent des amas de sphérolithes de calcite dans les évidements du grès inférieur.

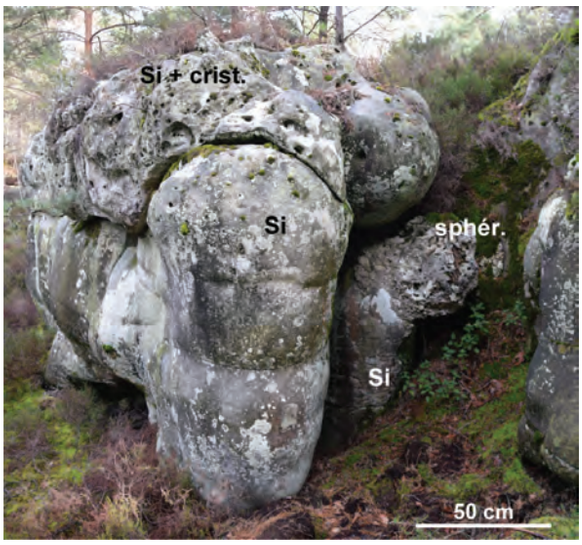


Fig. 13 : « Béorlots », Route de la Gorge aux Archers. Encapuchonnement du grès quartzite inférieur (Si) par les grès quartzite à cristallarias de calcite (Si + crist.) et un amas de sphérolithes coalescents (sphér.) dans un évidemment du grès inférieur.

Les groupements de cristaux

Plusieurs gisements de calcite sableuse en cristaux sont connus dans le secteur de Fontainebleau et Nemours. Ils ont été « exploités » par les collectionneurs privés et de nombreux échantillons existent aussi dans les musées publics. Tout le monde s'accorde pour dire que ce sont les carrières de grès du secteur de « Belle Croix » et du « Rocher-St-Germain » qui ont fourni les plus beaux spécimens, en taille, disposition et netteté des cristaux. Il n'existe pas de description de ces gisements. Nous présenterons ci-dessous ce qui est visible actuellement à la « Grotte aux Cristaux » et dans ses abords immédiats, et complèterons l'étude par des observations qui ont pu être faites et qu'on peut encore faire localement dans le secteur de Nemours.

« Les Gondonnières » – Larchant (77)

Dans le sud du Massif de Fontainebleau, le secteur entre Puiselet et Larchant a fourni depuis les années 1950 plusieurs gisements de cristaux de calcite sableuse. Il en apparaît encore sporadiquement dans les carrières actives, mais la plus grosse occurrence a été celle de la carrière des « Gondonnières », à l'est du hameau de Bonnevault. Le niveau à cristaux et poupées de calcite sableuses y a été « attaqué » sur une centaine de mètres et les sables contenant les cristallisations mis en déblais. Des volumes considérables ont été récupérés par les collectionneurs pendant 2 à 3 ans (plusieurs tonnes de cristallisations selon notre estimation).

La coupe de la carrière montrait les relations entre différentes variétés de calcites sableuses (Fig. 14). Les calcites sableuses se disposaient entre la base

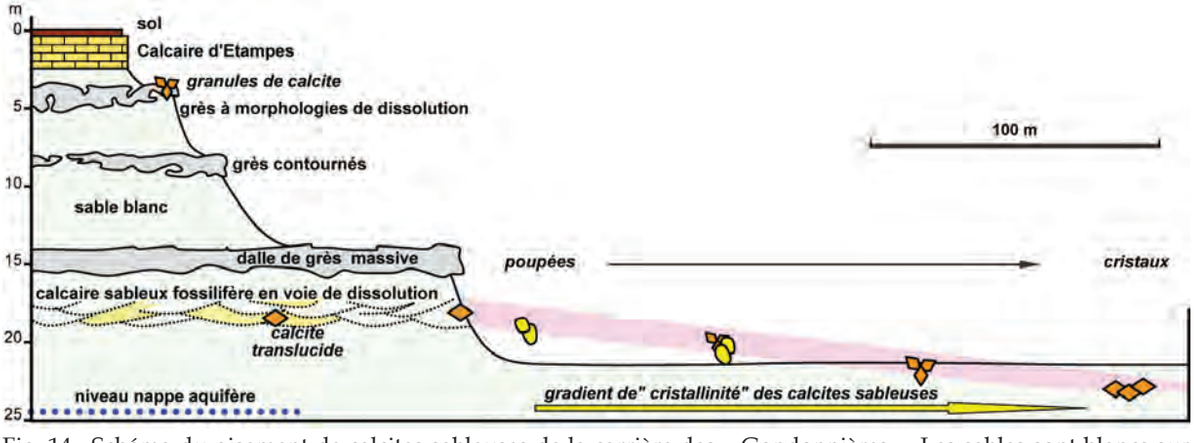


Fig. 14 : Schéma du gisement de calcites sableuses de la carrière des « Gondonnières ». Les sables sont blancs sur toute la hauteur de l'exploitation, des sables jaunâtres apparaissaient par endroits au plancher de la carrière. Une grande variété de calcite sableuse se disposait selon un niveau faiblement incliné qui se raccordait à un niveau coquillé altéré.

de l'exploitation et une lentille de grès calcaire coquillé grossier, à stratifications entrecroisées, correspondant à des dépôts de chenaux de marée. Le niveau carbonaté avait environ 1,5 mètre de puissance et se situait à 2-3 mètres au-dessus du plancher de la carrière. Les calcites sableuses montraient une grande variété de morphologies.

- de grands groupements horizontaux, formés de la coalescence de cristallarias à grands rhomboèdres de 2 à 4 centimètres d'allongement et de cristallarias hérissées de pointes de rhomboèdre de 2 à 5 millimètres d'arête (Fig. 15A). Ces cristallarias à grands rhomboèdres se rencontraient en avant de la lentille de calcaire coquillé, et en profondeur, au plancher de la carrière. Les plus beaux spécimens ont été récupérés à quelques

50 centimètres sous le plancher de la carrière et à moins d'un mètre au-dessus du niveau de la nappe phréatique actuelle. Ces calcites étaient de couleur blanche à jaunâtre selon la couleur du sable encaissant ;

➢ des cristallarias plus petites, de 5 à 10 centimètres de diamètre, hérissées de belles pointes de rhomboèdre (Fig. 15B), étaient dispersées dans le sable blanc à la base de l'exploitation jusqu'à 1 mètre de hauteur et selon un niveau assez bien délimité ;

➢ des cristallarias similaires étaient encapuchonnées par des concrétions de calcite sableuse, généralement lisses en surface, sans pointe de rhomboèdre. Ces poupées englobant des cristallarias antérieures se rencontraient vers 1,5 à 2 mètres au-dessus du plancher de l'exploitation et se situaient plus près des calcaires coquillés que les précédentes ;

➢ des poupées formées de l'agglomération de plusieurs concrétions étaient abondantes immédiatement sous le niveau de calcaire coquillé (Fig. 2F & 16). Les poupées avaient entre 5 et 10 centimètres de diamètre, pouvaient atteindre 30-40 centimètres, et certaines d'allongement horizontal atteignaient 100 centimètres et plus. Certaines avaient des pointes de rhomboèdre à leur surface ;

➢ des cristaux translucides de couleur miel, donc sans inclusion de sable, de taille infra centimétrique se rencontraient dans le calcaire coquillé, tapissant des vides de dissolution (Fig. 2G) et moulant l'intérieur de coquilles.

Le calcaire coquillé était complètement altéré, formé d'amas de calcaire cristallin avec de rares débris de coquilles primaires (Fig. 16). A l'évidence, une partie importante du calcaire avait été dissous et le calcaire cristallin qui moulait les traces de coquilles était secondaire. Latéralement, le niveau coquillé passait à un sable grossier à

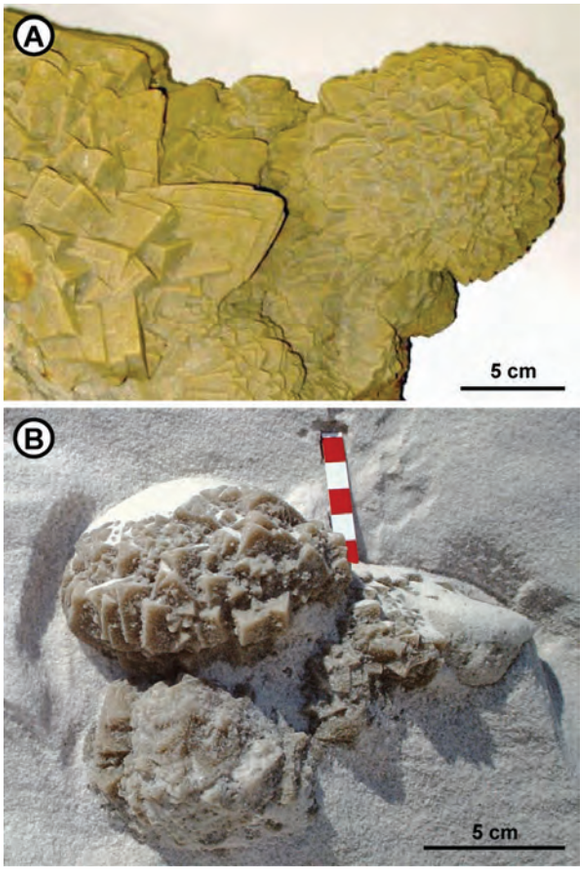


Fig. 15 : Carrière des « Gondonnières ». (A) : cristallaria multilobée jaunâtre à cristaux de calcite sableuse de tailles très variables. Cet échantillon provient du plancher de la carrière et formait une plaque horizontale de plus de 50 centimètres d'allongement. Échantillon visible au Musée de Minéralogie de l'École des Mines à Paris ; (B) : cristallaria multilobée *in situ* dans le sable blanc. Une poupée de calcite y est accolée à droite.
Cliché : M. Thiry.

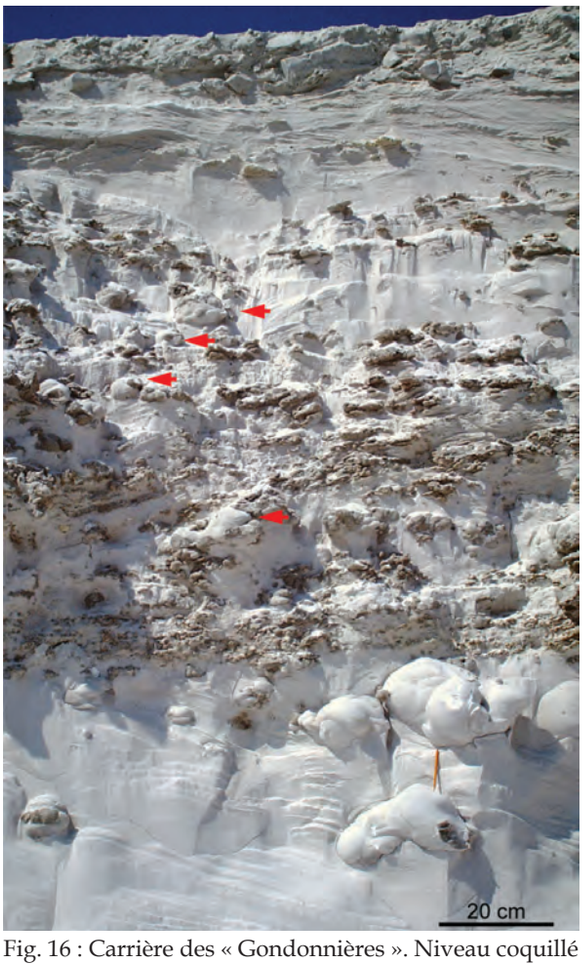


Fig. 16 : Carrière des « Gondonnières ». Niveau coquillé altéré et recristallisé avec des poupées de calcite sableuse à sa base. Noter que des poupées existent aussi au sein du niveau (flèches) et prennent en écharpe des lentilles de calcaire recristallisé. C'est dans ce niveau qu'ont été récupérées les calcites translucides couleur miel.
Cliché : M. Thiry.

stratifications entrecroisées, avec fantômes de coquilles entièrement décalcifiées. La dissolution et la recristallisation du calcaire paraîssent être relativement anciennes car les calcites translucides miel qu'il renferme ne montrent pas de traces de dissolution.

Enfin, la dalle supérieure de grès quartzite était couverte de granules millimétriques de calcite sableuse, ce sont les grès cloutés (Fig. 2E). Seules les surfaces peu inclinées en étaient couvertes, toutes les surfaces plus inclinées, en particulier celles autour des conduits sableux qui traversaient la dalle, en étaient dépourvues.

« Mont Sarrasin » - Puiselet (77)

La carrière qui était exploitée au sud du « Mont Sarrasin » à Puiselet a fourni de très grandes cristallarias au tournant des années 1960-1970. Nous ne connaissons aucun document donnant la description du gisement. Les cristallarias se distinguent par plusieurs caractères :

- elles sont de couleur beige à grisâtre, jamais blanches à notre connaissance ;
- les rhomboèdres atteignent plusieurs centimètres et leurs faces sont presque systématiquement couvertes par de multiples pointes de rhomboèdre (Fig. 2A) ;
- les petits rhomboèdres tardifs sont parfois de type « squelettique », avec arrêtes en relief et faces déprimées (Fig. 17), ils correspondent à un habitus primaire et ne sont pas dus à une altération tardive ;
- les cristallarias présentent néanmoins souvent des rhomboèdres arrondis par dissolution.

« Les Courtins » – Nemours (77)

La carrière des « Courtins » montre d'anciennes excavations pour la recherche de cristaux de calcite sableuse. Elle présente la particularité d'avoir vers le tiers supérieur un niveau calcaire similaire au Calcaire de Darvault (Dollfus, 1913). Les cristallarias s'échelonnent sur environ 3 mètres de hauteur et présentent différents faciès (Fig. 18) :

- les cristallisations les plus élevées sont jaunâtres, comme le sable qui entoure le niveau calcaire altéré. Elles présentent des structures verticales, avec alignement de petites cristallarias ou des discontinuités non cimentées qui rappellent des conduits karstiques. Quelques fois, elles incluent des niveaux argileux de couleur jaune-ocre qui correspondent selon toute vraisemblance à des argiles de décalcification, et même quelques résidus sédimentaires carbonatés ;
- les calcites les plus profondes sont formées d'un enchevêtrement de cristallarias à cristaux de tailles variables (de 0,5 à 4 centimètres), formant une dalle horizontale sub-continue de 4 à 8 centimètres d'épaisseur. Les plus beaux rhomboèdres sont généralement visibles sur le pourtour équatorial des dalles et éventuellement sur le haut, alors que ceux de la partie inférieure sont généralement plus petits et de disposition plus confuse. On y distingue des générations successives de cristallarias et en particulier une génération remarquable par une pigmentation noire en surface et des petits rhomboèdres « squelettiques » comme ceux du Puiselet. Des débris et empreintes de fossiles subsistent dans certaines cristallarias (Fig. 19A). Un petit oursin a été trouvé dans l'une d'elles ;



Fig. 17 : Puiselet. Grands rhomboèdres couverts par des pointes de rhomboèdre d'aspect « squelettique », avec arêtes et pointes en relief par rapport aux faces.
Cliché : M. Thiry.

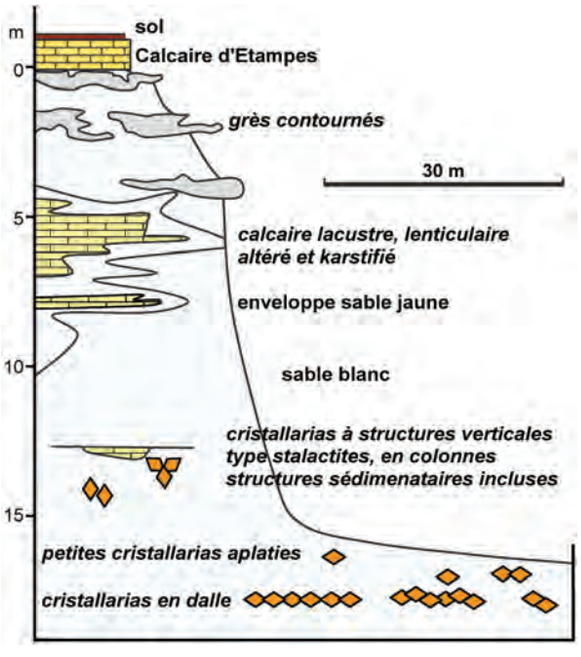


Fig. 18 : Schéma de la carrière des « Courtins ». Les cristallarias de calcites sableuses se disposent suivant 2 niveaux et ont des morphologies différentiées en rapport avec un paléo-niveau de la nappe.

➢ entre les deux occurrences, ou au-dessus de la dalle inférieure, on trouve d'assez nombreuses cristallarias de 5 à 10 centimètres de diamètre. Certaines sont sphéroïdales (Fig. 19B et 19C), d'autres sont de profil aplati en « crête de coq », avec rhomboèdres à axes divergents dans le plan horizontal.

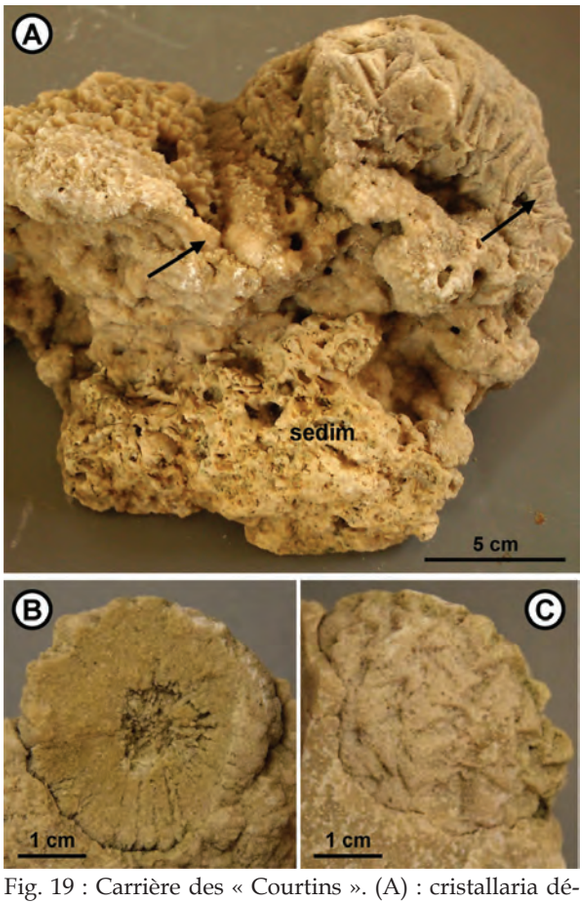


Fig. 19 : Carrière des « Courtins ». (A) : cristallaria développée au-dessus d'un niveau calcaire à empreintes de fossiles (sedim), noter la croissance vers le haut des concrétionnements (flèches), indiquée par les zonations (« encapuchonnements ») et les pointes de rhomboèdres ; (B) : intérieur de sphérolithe à structure radiée mise en exergue par un début d'altération ; (C) : idem, vue des pointes de rhomboèdre en surface du sphérolithe. Clichés : M. Thiry.

« Vallée de Glandelles » – Poligny (77)

Les calcites sableuses de cet affleurement ne sont pas contenues dans les Sables de Fontainebleau qui sont l'hôte classique de ces calcites. Dans cet affleurement, les calcites sont associées à une formation sableuse qui s'intercale entre le Conglomérat de Nemours (Éocène inf.) et le Calcaire de Château-Landon (Éocène sup.) (Fig. 20). Le sommet du conglomérat est raviné et forme une paléofalaise soulignée par des blocs silicifiés remaniés. La partie érodée a été comblée par une formation sableuse. Cette formation n'est pas « inventoriée » dans la lithostratigraphie locale. Si on veut la rattacher à une formation du Bassin de Paris, on peut envisager une formation proximale des sables de l'Éocène moyen. Cela est sans importance pour le propos qui nous intéresse.

Des cristallarias de calcite sont visibles sur le revers est de l'affleurement. Ce sont des cristallarias de 3 à 5 centimètres de diamètre à pointes de rhomboèdre bien nettes. Les cristallarias forment un ensemble « noduleux » à allongement vertical (Fig. 21A). Le grès est très hétérogène, formé de plages amiboïdes interpénétrées de grès calcaire à grands cristaux de calcite (jusqu'à 1-2 millimètres) et de plages de grès siliceux avec nourrissage des grains de quartz identiques à ceux des grès de Fontainebleau (Fig. 21B). Une structure remarquable de cet affleurement est la présence d'empreintes de cristallarias dans le grès siliceux après dissolution des calcites sableuses (Fig. 21C).

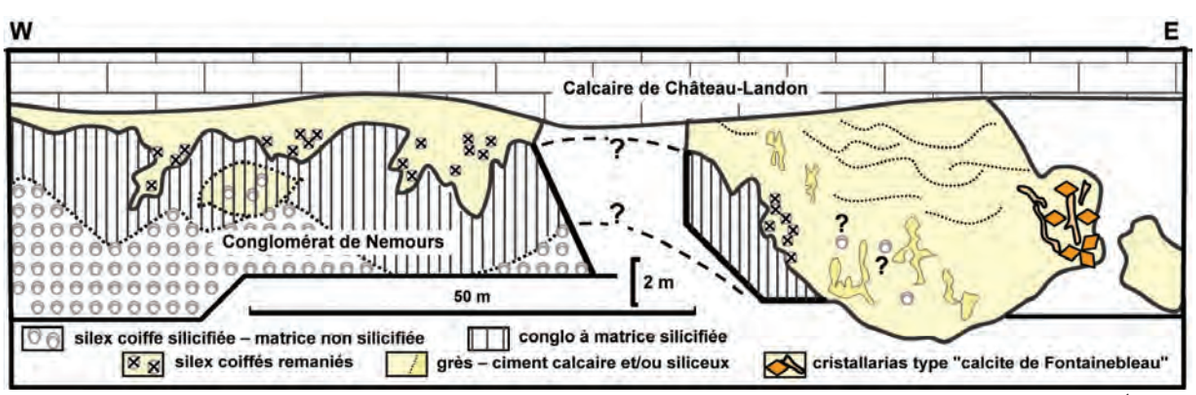


Fig. 20 : Schéma géologique de l'affleurement de la « Vallée de Glandelles ». Entre le conglomérat silicifié de l'Éocène inférieur et le calcaire de l'Éocène supérieur s'interpose une formation sableuse à ciment carbonaté et siliceux qui contient des cristallarias de calcite sableuse.

« Grotte aux Cristaux » – Fontainebleau (77)

Historique

Édouard-Alfred Martel (1859-1938), père de la spéléologie, résida à Fontainebleau pendant les étés de 1904 à 1909 et, dans ces temps, s'intéressa aux grottes et aux rochers de la forêt. C'est ainsi qu'il rapporte l'histoire de la « Grotte aux cristaux » (**Martel, 1910**). « *Les premiers cristaux ont été rencontrés en 1774 à Bellecroix par un carrier du nom de Laroche. Les carriers du premier Empire les ravagèrent. En septembre 1850, l'ouvrier Benoit mit à découvert la voûte de la grotte enfouie sous les décombres. Elie de Beaumont en fit un rapport à l'Académie des Sciences. Puis la grotte fut de nouveau comblée. Colinet la retrouva le 2 janvier 1891. Cette « Grotte aux Cristaux » est le gisement le plus remarquable de cette formation.* » Il est dit que Louis XVI vint en personne admirer ces merveilles (**Gaudant, 2004**). C'est apparemment de la redécouverte de la grotte que datent les très nombreuses pièces de calcite de « Belle-Croix » dispersées dans les musées du monde entier. Une des nombreuses « guinguettes » de la forêt de Fontainebleau y était encore ouverte au début des années 1980. Les promeneurs y trouvaient rafraichissement et elle veillait sur les lieux. Avec sa disparition, la grotte a été vandalisée, les barreaux de fer ont dû être ressoudés à plusieurs reprises. Les grands blocs qui étaient exposés ont été emportés et les têtes des grandes cristallisations du plafond brisées (probablement sans grand profit pour les vandales). C'est ainsi, et le fait n'est pas nouveau vu les barbelés et grillages qu'on peut voir sur les cartes postales du début du XX^{e} siècle.

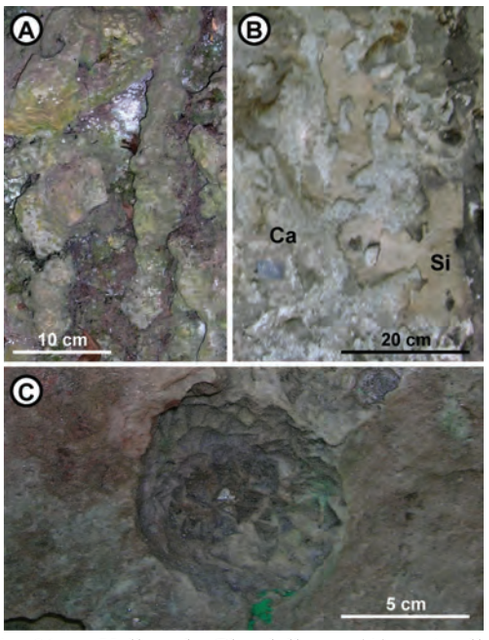


Fig. 21 : « Vallon de Glandelles ». (A) : cristallarias coalescentes se disposant dans une structure verticale ; (B) : interpénétrations de plages amiboïdes de grès à ciment de calcite (Ca) et ciment siliceux (Si) ; (C) : empreintes de cristallaria dans le grès à ciment siliceux. Clichés : M. Thiry.

Description

Essayer de comprendre comment se sont formées les remarquables cristallisations de calcite sableuse nécessite d'analyser les différents éléments qui composent la grotte et de reconnaître leurs relations mutuelles. L'observation est compliquée par l'accès limité pour faire les tests « primaires » de dureté et d'attaque à l'acide et par la présence de films de calcite secondaire qui recouvrent de nombreuses surfaces. La coupe qui peut être dressée montre un certain nombre de points qui n'avaient pas été soulignés jusqu'à présent (Fig. 22) :

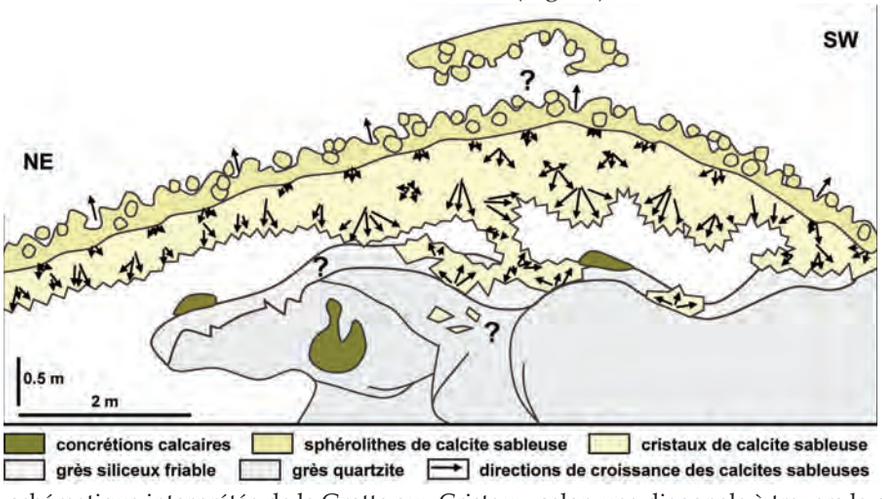


Fig. 22 : Coupe schématique interprétée de la Grotte aux Cristaux, selon une diagonale à travers la grotte. Les cristallisations de calcite prennent naissance sous le dévers d'une couche qui est inclinée vers le fond de la grotte. Elles reposent sur la dalle de grès qui apparemment préexistait puis ont été partiellement incluses dans un grès siliceux friable. Le toit de la grotte est formé par des concrétionnements de calcite en boules.

➢ d'entrée, il faut souligner que la grotte n'était pas une grotte lors de sa découverte, mais était remplie de sable blanc avec très nombreuses cristallarias de calcite dispersées au sein du sable. Tout l'espace « vide » était rempli de sable et de cristaux de calcite sableuse. Il ne faut pas se laisser abuser par la vue actuelle ;

➢ la partie supérieure et la voûte de la grotte sont formées de l'agglomération par précipitation de diverses calcites sableuses. On y reconnaît plusieurs unités, dont, d'une part, la partie centrale de la voûte est apparemment formée d'un niveau de grès calcaire, jaunâtre, peu structuré et incliné vers le fond de la grotte, c'est à dire à pendage vers le sud-est (A), et, d'autre part, au-dessus de ce grès calcaire, ce sont des sphérolithes de calcite sableuse qui forment un niveau d'au moins 1,5 mètre d'épaisseur si l'on en juge par le petit affleurement visible au-dessus de la voûte. C'est une formation comparable aux grès calcaires à sphérolithes décrits précédemment. Les polarités dans cette accumulation suggèrent une croissance par le haut (B) ;

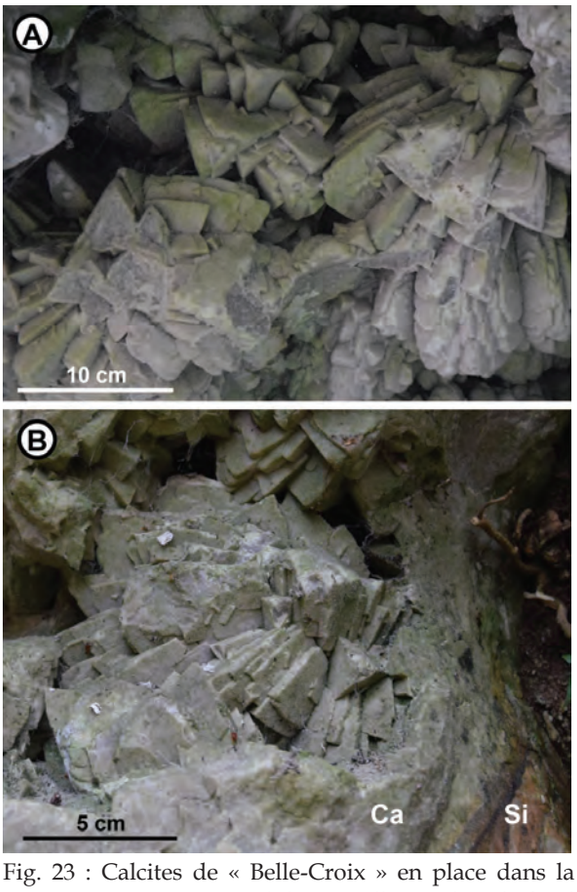


Fig. 23 : Calcites de « Belle-Croix » en place dans la « Grotte aux Cristaux ». (A) : cristallarias dans le fond de la grotte. L'orientation des rhomboèdres montre une cristallisation du fond de la grotte vers l'avant ; (B) : cristaux au-dessus du grès quartzite (extrémité sud-ouest). Le contact entre le grès et les cristaux est occulté par des raies ferrugineuses tardives. Ca : grès calcaire ; Si : grès quartzite. Clichés : M. THIRY.

➢ les Calcites de Fontainebleau forment la partie inférieure, le « plafond » de la grotte. L'orientation des rhomboèdres de calcite et des gerbes cristallines montrent des cristaux implantés sur la voûte de la grotte et à croissance vers le bas, à la manière de stalactites ou de cristallisations géodiques, à la différence que dans ce cas la géode est remplie de sable (Fig. 23A) ;

➢ la base de la grotte est formée par une lentille de grès de Fontainebleau classique, à ciment siliceux. COLINET l'a fait retailler pour la présentation de l'ensemble. En revanche, la nature de la partie supérieure de cette dalle reste imprécise. C'est apparemment un grès siliceux friable, de 10 à 15 centimètres d'épaisseur, qui, par endroit, s'écrase sous les doigts. Ce grès recouvre et enrobe les cristallarias de calcite dont les plus grandes émergent de la couche de grès friable. Le contact entre le grès friable et le grès sous-jacent montre des formes échancrées qui pourraient être des cristaux de calcite pris dans le grès quartzite. Ailleurs, les contacts sont occultés par des dépôts secondaires sur des fractures du grès (Fig. 23B) ;

➢ des concrétions de calcite brune sans sable inclus sont visibles en différents endroits sur des replats de la dalle de grès et sur le front de taille de la dalle. Ce sont des concrétions tardives qui recouvrent les surfaces taillées et sont donc postérieures à l'aménagement de la grotte par COLINET.

« Petit Mont Chauvet » – Fontainebleau (77)

Au sud-ouest du mont, affleure une dalle de grès ferrugineux démantelée par des travaux. La dalle supporte des cristallarias à beaux rhomboèdres de calcite (grès clouté) de 0,5-3 centimètres de diamètre, jaune à ocre, posés régulièrement sur la dalle (Fig. 24A). L'affleurement montre une disposition singulière avec des cristallarias de calcite qui s'alignent sur des fractures du grès (Fig. 24B). Cette disposition indique clairement que les calcites sont postérieures au grès, même si elles paraissent parfois un peu enchâssées dans le grès.

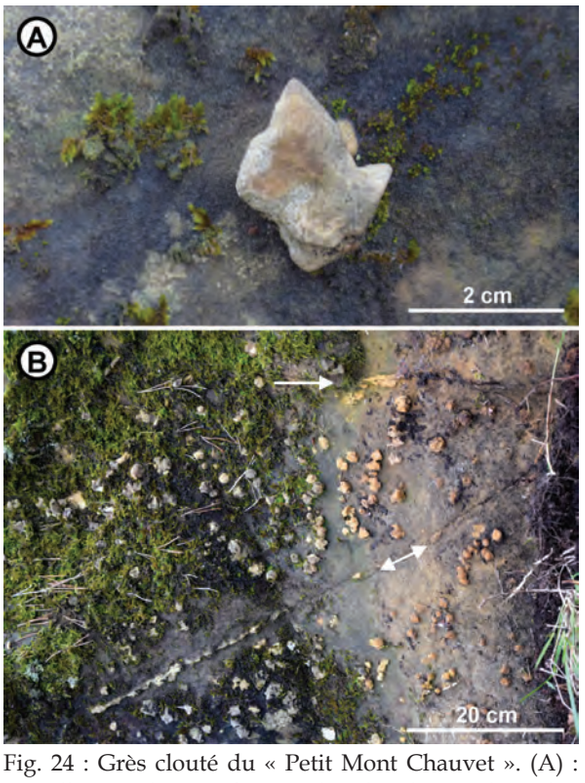


Fig. 24 : Grès clouté du « Petit Mont Chauvet ». (A) : cristallaria isolée aux formes rhomboédriques bien distinctes ; (B) : cristallarias centimétriques sur la face supérieure d'une dalle avec des cristallisations alignées sur deux fissures (flèches). Clichés : M. Thiry.

« Gorges du Houx » – Fontainebleau (77)

La dalle sommitale de grès présente souvent un faciès en « nid d'abeille », percé de cavités de 1 à 10 centimètres de diamètre (Fig. 25). Ces cavités sont évasées vers l'extérieur, « désespérément » vides et sans morphologie particulière. Néanmoins, les Rochers des « Gorges du Houx » traversés par la Route Jean montrent, à la faveur d'anciennes carrières, des morphologies moins altérées qui permettent d'identifier le grès à l'origine des « nids d'abeille ». Plusieurs rochers montrent que ces grès contiennent des nodules de grès calcaire à ciment spathique, c'est à dire des cristallarias, même si les pointes de rhomboèdre n'ont pas été préservées. Mais le faciès le plus spectaculaire est celui du moulage de cristallarias de calcite par la cimentation du grès quartzite hôte et qui ont été évidés par la dissolution préférentielle de la calcite (Fig. 26).

Il faut noter l'alignement des cavités qui correspondent à des cristallarias altérées et leur taille variable d'un niveau à l'autre, mais relativement homogène au sein d'un niveau. Cette distribution est similaire à celles observées pour les cristallarias de calcite dans les carrières de sable. Les niveaux horizontaux correspondent à l'évidence à d'anciens niveaux d'une nappe qui fluctuait ou au contraire remontait ou s'abaissait graduellement.



Fig. 25 : « Gorges du Houx ». Grès quartzite à faciès « nid d'abeille ». Noter l'alignement des cavités d'altération. Cliché : M. Thiry.



Fig. 26 : « Gorges du Houx ». Moulage en creux de cristallarias de calcite dans le grès quartzite après dissolution des cristallarias de calcite. Cliché : M. Thiry.

Interprétation des arrangements

Les calcites sableuses sont clairement indépendantes des structures et dispositions sédimentaires et ne sont pas spécifiques des sables de Fontainebleau, puisqu'elles se développent aussi dans d'autres formations sableuses. Elles sont tardives, post-sédimentaires.

En même temps, le dépôt de masses relativement importantes de calcite nécessite d'importer le carbonate et de le renouveler au fur et à mesure qu'il précipite. C'est l'eau qui est le vecteur des carbonates à l'origine des calcites sableuses. Et si la calcite est relativement soluble, par rapport à d'autres minéraux, comme la silice par exemple, il y a néanmoins besoin d'importants flux d'eau pour précipiter ces volumes de calcite.

Les faciès et les arrangements des calcites sableuses donnent des indications sur les conditions paléo-hydrologiques qui ont présidé à leur mise en place.

Calcites sableuses sphérolithiques

Les sphérolithes isolés sont toujours des sphéroïdes réguliers, sans aplatissement polaire. Cette structure montre que les sphérolithes se sont formés dans un milieu isotrope par rapport aux mécanismes de précipitation de la calcite. Les structures ovoïdes et sphériques sont caractéristiques d'une précipitation dans l'eau, en milieu saturé (les milieux agités qui retournent et roulent les objets au cours de leur formation sont évidemment exclus dans le cas des calcites sableuses). Les sphérolithes ont précipité dans un environnement homogène, aux écoulements ralentis, typiquement au sein d'une nappe.

Mais à l'échelle de l'affleurement, les coupes montrent néanmoins un géotropisme, avec faciès massifs en tête, structures laminées entrecroisées dans la partie moyenne et des sphérolithes « libres » au sein du sable à la base de la coupe. Les structures laminées obliques indiquent des écoulements. La calcite précipiterait le long de ces écoulements, éventuellement à l'interface zone saturée-vadose. La cimentation des sphérolithes par de telles lamines, comme dans le « Rocher Carrosse », pointe des précipitations isotropes au sein de la nappe (sphérolithes) suivies de précipitations le long de lignes d'écoulement (lamines). Cette succession pourrait correspondre à un enfoncement progressif de la nappe dans le paysage (Fig. 27).

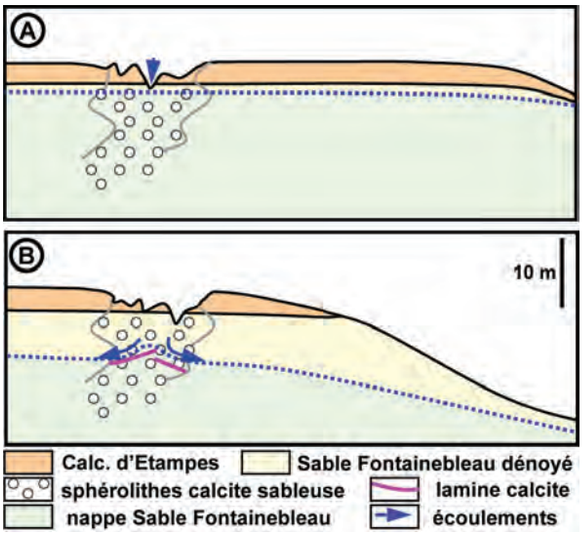


Fig. 27 : (A) schéma de la formation des amas de sphérolithes au sein de la nappe phréatique ; (B) : formations de lamines de calcite le long des écoulements quand la nappe vient à baisser. Mais cela n'explique pas la nature des structures verticales délimitées que montrent les amas de sphérolithes.

Enfin, le développement récurrent d'habitus rhomboédriques dans la partie corticale des sphérolithes indique une précipitation dans des conditions proches de l'équilibre avec la calcite, alors que les sphérolithes constitués de calcite fine ont précipité dans des milieux plus déséquilibrés, à sursaturation plus forte vis-à-vis de la calcite. Ce changement dans le régime de précipitation est vraisemblablement à mettre en relation avec la modification du milieu sous l'effet des cimentations. En début de cimentation, la porosité du sable est élevée, l'eau est renouvelée rapidement par les circulations et des sursaturations peuvent être atteintes. En fin de cimentation, le volume de sable poreux est réduit, les circulations sont ralenties et les eaux se rapprochent de l'équilibre avec la calcite, favorisant le développement de plus gros cristaux.

Calcites sableuses en cristaux

Le groupement des cristallarias en dalles horizontales indique clairement leur formation au niveau de la nappe phréatique (Fig. 28).

Ailleurs, existent des structures allongées verticalement qui indiquent des milieux vadoses, c'est à dire au-dessus de la nappe, et où l'eau circule selon des chemins préférentiels. C'est le cas des cristallarias coalescentes le long de structures verticales. C'est aussi le cas des cristallarias formant un bulbe sous les dalles horizontales (comme une stalactite accrochée au plafond d'une grotte) ou au contraire des cristallarias zonées avec « encapuchonnements » de couches successives de cris-

taux de calcite sableuse (à la manière de la croissance des stalagmites).

Des cupules de dissolutions circonscrites de 1-2 centimètres de diamètre et quelques millimètres de profondeur indiquent des infiltrations d'eau localisées au-dessus de ces cupules. Probablement par intermittence et au goutte à goutte, comme sur le haut des stalagmites qui montrent des cupules similaires à l'endroit où tombe l'eau. Ces cupules indiquent également un milieu désaturé, vadose, au-dessus de la nappe phréatique. Elles se forment indifféremment à l'apex de cristallarias isolées et sur le haut de dalles horizontales.

Par ailleurs, les variations d'habitus des cristaux renseignent sur les variations du chimisme des eaux au cours de leur écoulement. Les cupules de dissolution montrent que les solutions sont au moins périodiquement sous-saturées en calcite quand elles arrivent sur les cristallarias. Cette sous-saturation ne persiste pas puisqu'on ne constate pas de dissolution le long des écoulements qui débordent de la cupule. La solution atteint la saturation et éventuellement la sursaturation au sein de ces cupules. Les cristallisations se font alors que l'eau s'écoule autour des groupements de cristaux. Les cristaux les plus grands se disposent souvent sur le plan équatorial des cristallarias et des dalles, alors que ceux sur le dessus et le dessous des dalles montrent en général des rhomboèdres plus petits et plus irréguliers. La variation d'habitus cristallin reflète l'évolution des solutions au cours de leur écoulement. Les cristaux les plus réguliers se forment quand les solutions sont proches de l'équilibre. L'état de saturation des eaux évoluerait entre leur arrivée au sommet des cristallarias, leur déversement sur les flancs et leur évacuation (suintement) à la base des cristallarias. C'est un dispositif comparable à celui des stalagmites, avec cupules de dissolution en tête, puis changement progressif de la saturation en calcite depuis l'apex de la stalagmite vers ses flancs (Chouchoud, 2008).

La similitude de ces structures avec les spéléothèmes des cavités karstiques est remarquable. Ces dispositions indiquent que les cristallarias de calcite sableuse sont liées à la zone vadose des sables, c'est à dire à la zone d'infiltration des eaux de surface vers la nappe (Fig. 28). Le niveau de la nappe phréatique joue un rôle de barrière, établissant un gradient de précipitation fort sur lequel se forment les volumes les plus importants de calcite.

Âge des calcites sableuses

Les datations ^{14}C et U-Th des cristaux et des sphérolithes de calcite sableuse du Massif de Fontainebleau et des alentours montrent qu'elles datent toutes du Quaternaire (Tab. I). La formation des calcites sableuses est complètement étrangère au dépôt des sables, c'est un phénomène tardif, lié au climat et aux sables.

Plus de 60 % des datations obtenues correspondent au pléniglaciaire du Wurm. L'âge plus jeune des calcites des grès cloutés est probablement lié à leur position sommitale, moins profonde. Il faut encore souligner la relative rareté des calcites plus anciennes. Elle est probablement due à l'érosion ultérieure des gisements peu profonds.

Les âges sont aussi très étalés au sein d'un gisement. Le gisement des « Gondonnières » à Larchant montre des cristaux translucides miel qui ont été datées à 400.000 ans, des cristallarias de

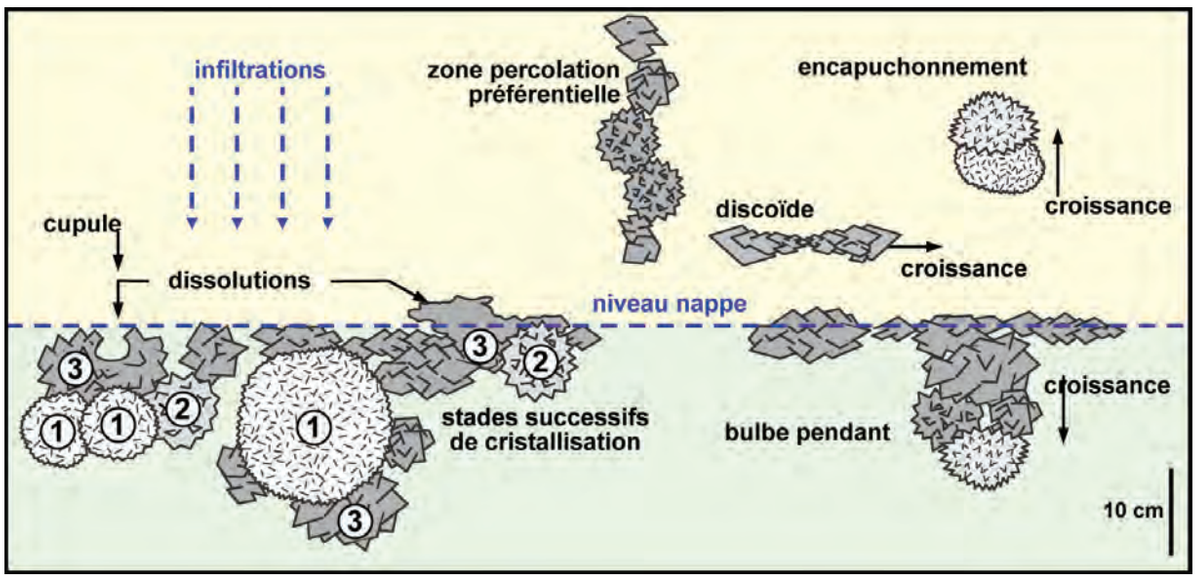


Fig. 28 : Schéma des arrangements des cristallarias mis rapport avec les conditions hydrologiques.

Tab. 1 : Datations radiométriques des concrétions et cristaux de calcite associés aux sables du Massif de Fontainebleau et alentours. Datations ^{14}C ANU = Australian National University et, Poz = Poznan Radiocarbon Laboratory et datations U-Th Laboratoire du BRGM.

No éch.	localisation	habitus	No lab ^{14}C	âges ^{14}C	âges U -Th
Sables de Fontainebleau					
8609	Puiselet, 77 - Mont Sarrasin	cristallaria de rhomboèdres (Ø 30 cm)	Poz-24382	>50 000	323 000
8787	Larchant, 77 - Gondonnières	cristaux translucides (1 cm)	Poz-29896	>52 000	400 000 (?)
6790	Chapelle-la-Reine, 77 - Butteaux	cristaux translucides (Ø 5 cm)	Poz-49823	>45 000	194 000
6793	Larchant, 77 - Bonnevault	cristallaria de rhomboèdres (Ø 15 cm)	Poz-24383	51 000 ± 5 000	
8931	Darvault, 77 - Grande Garenne	cristallaria de rhomboèdres (Ø 5 cm)	Poz-49825	49 000 ± 3 000	
8930	Fontainebleau, 77 - Roche Eponge	cristallaria de rhomboèdres (Ø 2 cm)	Poz-49824	45 000 ± 2 000	
8933	Fontainebleau, 77 - Grotte Cristaux	cristallaria de rhomboèdres (Ø 3 cm)	Poz-49827	44 000 ± 2 000	
8942	Fontainebleau, 77 - Grotte Cristaux	cristallaria de rhomboèdres (Ø 5 cm)	ANU-6639	33 630 ± 640	
8940	Larchant, 77 - Gondonnières	cristallaria de rhomboèdres (Ø 30 cm)	ANU-6637	32 950 ± 5 200	
9003	Fontainebleau, 77, Cuvier Chatillon	sphérolithes coalescents (Ø 4-5 cm)	Poz-73201	32 900 ± 500	
8605	Fontainebleau, 77 - Rocher Carrosse	sphérolithes coalescents (Ø 1-2 cm)	Poz-24379	31 700 ± 300	
8941	Larchant, 77 - Gondonnières	cristallaria de rhomboèdres (Ø 15 cm)	ANU-6638	26 880 ± 1 140	
8965H	Montigny/Loing, 77, Roche à Boule	sphérolithes coalescents (Ø 3 cm)	Poz-73200	25 100 ± 210	
8943	Larchant, 77 - Gondonnières	grès cloutés, granules (Ø 3-5 mm)	ANU-6636	14 180 ± 330	
Sables de l'Éocène					
8597	Poligny, 77 - Vallée de Gladelle	cristallaria de rhomboèdres (Ø 2-3 cm)	Poz-24374	>48 000	300 000

calcite sableuse à 32.950 et 26.880 ans BP[2], et des grès cloutés vers 14.000 ans BP. Même en faisant abstraction de la calcite translucide et des grès cloutés, qui sont très différents des cristallarias communes, il y a un écart d'environ 6.000 ans pour des cristallarias provenant du même niveau, et même 25.000 ans si on considère la cristallaria datée de la carrière de « Bonnevault » qui est à moins d'un kilomètre de là. De même, au voisinage de la « Grotte aux Cristaux », des âges à 33.630 et 44.000 ans BP ont été obtenus pour deux cristallarias distantes d'environ 50 mètres.

Ces écarts d'âge ne sont probablement pas à mettre en relation avec la vitesse de précipitation des cristallarias, qu'on peut estimer plus rapide, mais ils montrent la stabilité et la pérennité des environnements de cristallisation. C'est en tout cas une hypothèse à tester en faisant plusieurs datations depuis l'intérieur jusqu'à l'extérieur des cristallarias.

Par ailleurs, la composition isotopique des glaces des pôles permet de suivre les dynamiques climatiques au cours du Quaternaire. L'isotope ^{18}O des glaces des pôles est élevé quand les quantités de glace stockées à la surface de la terre sont faibles (périodes interglaciaires) et diminue lorsque les stocks de glace augmentent (période glaciaire).

Le report des âges des calcites sableuses sur les courbes des variations de $\delta^{18}O$ dans les carottes de glace des pôles montre que les calcites sableuses précipitent pendant les phases de refroidissement, quand les pergélisols sont en cours de formation (Fig. 29). Néanmoins, les calcites sphérolithiques paraissent plutôt liées aux périodes de maximum d'accumulation de glace sur les continents. On peut souligner que les calcites plus jeunes des grès cloutés (14.180 BP) sont centrées sur le refroidissement du Dryas ancien.

[2] BP : de l'anglais « *Before Present* », soit âge exprimé en nombre d'années comptées vers le passé à partir du 1er janvier 1950

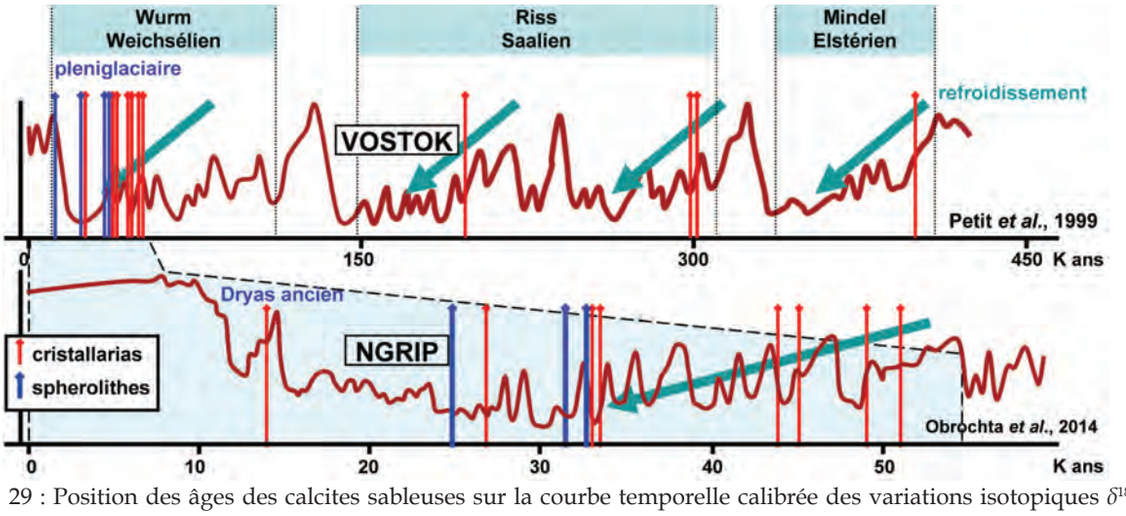


Fig. 29 : Position des âges des calcites sableuses sur la courbe temporelle calibrée des variations isotopiques $\delta^{18}O$ enregistrées dans les carottes de glace de VOSTOK (Antarctique) et NGRIP (Nord Groenland). Les calcites sableuses sont liées aux périodes de refroidissement des dernières glaciations. Erreur analytique sur les datations <± 10 %.

Caractéristiques des environnements glaciaires

Le calage des calcites sableuses sur les périodes froides du Quaternaire implique de les replacer dans le contexte des pergélisols (permafrost en anglais) qui prévalaient alors sous nos contrées.

Solubilité de la calcite en environnement périglaciaire

La calcite est soluble sous forme de bicarbonate ($Ca(HCO_3)_2$) et relativement insoluble sous forme de mono-carbonate ($CaCO_3$), c'est la calcite. Trois réactions fondamentales règlent la dissolution et la précipitation de la calcite :

(1) $CO_2(g) \leftrightarrow CO_2(aq)$

(2) $CO_2(aq) + H_2O \leftrightarrow HCO3^- + H^+$

(3) $CaCO_3 + HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$

L'élévation de la fugacité de CO_2 (teneur en CO_2 dissous) déplace successivement les équilibres (1), (2) et (3) vers la droite et entraîne la dissolution de calcite ; la diminution de la fugacité de CO_2 produit l'effet inverse et conduit à la précipitation de la calcite.

Or, le CO_2 est plus soluble dans l'eau froide que dans l'eau chaude (Fig. 30). En réchauffant de l'eau, elle se dégaze. C'est ce qui se produit quand vous chauffez de l'eau dans une casserole : les petites bulles accrochées au fond de la casserole vers 50-60° ne sont pas des bulles de vapeur d'eau, mais des bulles de gaz (O_2, CO_2, N_2) qui s'échappent car la solubilité des gaz diminue avec la température.

L'élévation de température déplace la réaction (1) vers la gauche et, par contrecoup, (3) également vers la gauche conduisant à la précipitation de calcite.

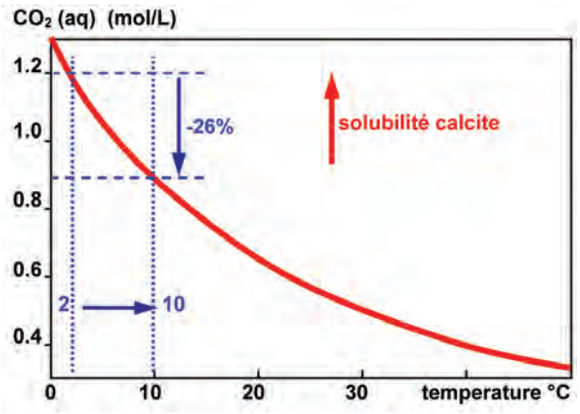


Fig. 30 : Diagramme de solubilité du CO_2 dans l'eau en fonction de la température. La solubilité du CO_2 diminue avec l'augmentation de la température, l'échauffement de l'eau conduit à son dégazement.

Quand une eau en équilibre avec le CO_2 atmosphérique se réchauffe de 2 à 10°C, elle perd plus de 25 % de son CO_2 dissous et 25 % de la calcite dissoute précipite. Le réchauffement de l'eau est un facteur très efficace pour la précipitation de la calcite et source d'ennuis dans les bouilloires domestiques et industrielles.

C'est le réchauffement des eaux de surface lors de leur infiltration vers la nappe qui est, selon toute vraisemblance, à l'origine de la précipitation des calcites sableuses.

Hydrologie des pergélisols

Les pergélisols se composent principalement de 2 unités :

- (1) une couche profonde gelée en permanence ;
- (2) une couche superficielle dite couche active car elle subit et réagit aux variations saisonnières de gel et dégel.

L'épaisseur des pergélisols est variable avec la durée et l'intensité des saisons de gel (Fig. 31). La couche active est réduite en épaisseur aux latitudes élevées, alors que le permafrost s'épaissit à ces latitudes. Aux latitudes plus basses et/ou pendant les périodes moins froides, le permafrost devient discontinu.

Il faut encore noter que l'eau est moins conductrice de la chaleur que les roches. En outre, elle présente une relative inertie thermique, de ce fait le gel y pénètre moins vite. Similairement, les roches poreuses, non saturées, dont les pores sont occupés par de l'air, ont aussi une inertie thermique plus grande. Ces comportements différentiés sont à l'origine de zones non gelées qui peuvent exister au sein du permafrost :

- les zones plus poreuses, moins conductrices du froid, gèlent plus lentement et des eaux issues des parties profondes non gelées peuvent s'y écouler ;
- sous les lacs, l'eau ne gèle que peu longtemps en profondeur et, de ce fait, le bilan thermique annuel peut être positif et conduire au dégel du permafrost au droit du lac. Ces zones sont appelées des thermokarsts ou taliks ouverts.

Les taliks sont donc des zones ou l'eau peut circuler au sein du permafrost. Ils peuvent correspondre à des remontées d'eaux de la nappe vers la surface, « naturellement » s'il existe un gradient hydraulique régional, ou sous l'effet de l'augmentation de pression due au gel d'une partie de l'eau de la nappe (en raison de augmentation de volume de la glace). Ils peuvent aussi être des structures d'engouffrement des eaux de surface vers la

nappe, à la manière d'un karst (d'où la dénomination de thermokarst), s'il existe une zone non saturée sous la couche gelée.

Le fonctionnement hydraulique des taliks n'est pas indépendant de la dynamique climatique. En période de refroidissement, le pergélisol s'approfondit et des surpressions dans la nappe alimentent des écoulements vers la surface. En période de réchauffement, des lacs se développent en surface conduisant à des thermokarsts qui alimentent les nappes mises en dépression par le dégel du permafrost à sa base.

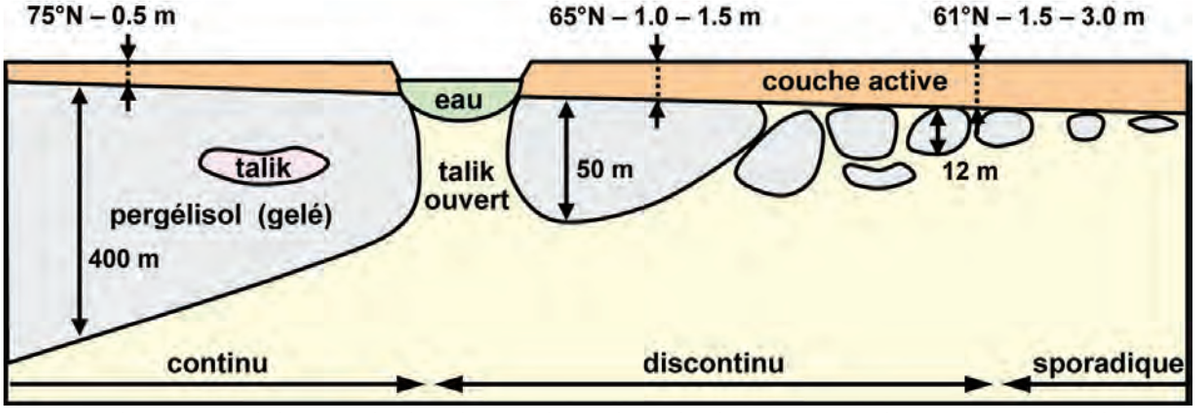


Fig. 31 : Schéma général des pergélisols et leur évolution latitudinale. Les zones gelées sont imperméables, mais des zones non gelées peuvent subsister ou se former et être le siège d'écoulements d'eau. D'après Dobinski (2012).

Calcites sableuses et dynamique climatique

Pendant les périodes glaciaires, la partie supérieure des sols est gelée jusqu'à des profondeurs de 10-20-50 mètres et même plus dans le Bassin de Paris. En revanche, en profondeur, le flux thermique provenant du centre de la terre continue à réchauffer le sous-sol. Il s'établit un front de température entre les formations superficielles gelées, le sous-sol, et les nappes aquifères qui ne subissent qu'un faible refroidissement (Fig. 32). Ce gradient est le plus « abrupt » lors du refroidissement, en début de période froide.

Pendant les périodes froides, les eaux de surface ont une fugacité (gaz dissous) de CO_2 relativement élevée. Cette fugacité en CO_2 augmente encore en s'infiltrant à travers les sols riches en matière organique (podzols et tourbières) caractéristiques des taïgas et toundras. Quand elles se réchauffent en atteignant les terrains plus chauds du sous-sol, elles se dégazent et la calcite précipite.

Mais, pour que ce mécanisme de précipitation fonctionne, il faut que le pergélisol ne soit pas trop épais et reste discontinu pour permettre les infiltrations des eaux froides, et que les roches de subsurface et les nappes conservent une température proche de celle qu'elles avaient avant la glaciation. Alors, des cristallarias de calcite sableuse sont susceptibles de précipiter jusqu'à des profondeurs de 20 mètres et plus. C'est aussi là l'explication de la liaison des calcites sableuses avec les périodes de refroidissement.

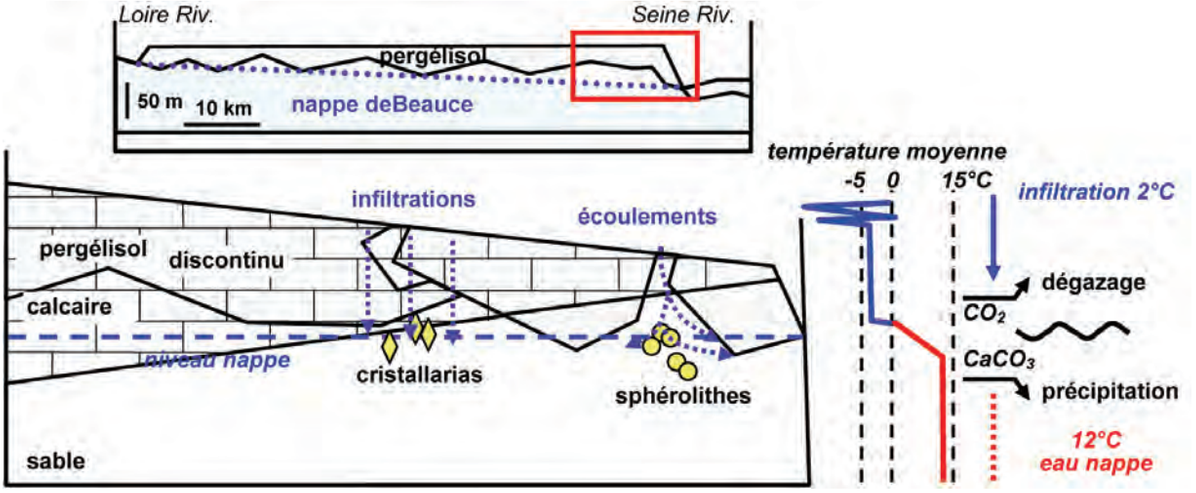


Fig. 32 : Schéma conceptuel de la précipitation des calcites sableuses dans les formations sableuses pendant les périodes froides du Quaternaire. C'est le réchauffement des eaux d'infiltration dans le sous-sol qui induit la précipitation des calcites sableuses dans les aquifères sableux.

Néanmoins, les amas de calcites sphérolithiques, comme ceux du « Carrosse », de la « Roche à Boule », du « Cuvier Châtillon », sont d'âge plus jeune et paraissent liées aux périodes de maximum d'accumulation de glace sur les continents. Ce maximum d'accumulation de glace sur les continents correspond en fait déjà au réchauffement sous les latitudes du Bassin de Paris (au début du réchauffement, la glace ne fond pas et continue de s'accumuler aux pôles). Il faut éventuellement voir là une liaison avec le développement des thermokarsts lors des périodes de réchauffement. De plus, les périodes de réchauffement sont caractérisées par une forte augmentation de la pluviosité et du ruissellement sur les sols gelés. Interviendrait alors la formation de calcites sableuses dans les thermokarsts où les eaux de ruissellement s'engouffrent.

Il subsiste néanmoins une difficulté dans la compréhension du système quand on prend en considération les bilans massiques des infiltrations. Pour les cristallarias de calcite sableuses qui se forment en profondeur, comme celles des carrières de la partie méridionale du Massif de Fontainebleau (Larchant, Puiselet, Nemours et Darvault) on conçoit que les infiltrations lentes et limitées des eaux n'ont que peu d'effet sur la température de l'aquifère. En revanche, les grands amas de sphérolithes de calcite sableuse du Nord du Massif ont nécessité l'apport de masses d'eau plus conséquentes. Dans ces conditions, l'infiltration d'importants volumes d'eau froide par des structures du type gouffre conduirait rapidement au refroidissement de l'encaissant et donc à l'annulation du front thermique moteur de la précipitation de calcite. On peut imaginer que ces amas de sphérolithes correspondent à des taliks de thermokarsts qui fonctionnaient en exore, c'est à dire une zone de source où les eaux plus chaudes de la nappe remontaient et se mélangeaient aux eaux froides de la surface. Ce dispositif hydraulique entretiendrait un front chaud près de la surface, même en présence d'infiltrations importantes d'eau froide. Mais aucune observation ne permet d'étayer cette hypothèse actuellement.

L'âge plus jeune des calcites des grès cloutés qui se forment à la face supérieure des dalles de grès sommitales est lié à la conduction thermique plus élevée des grès (non poreux) par rapport aux sables. De ce fait, un gradient de température plus abrupt peut exister au sommet de dalles de grès lors de l'enfoncement d'un front froid. Ainsi, des calcites plus jeunes ont pu se former sous couverture faible (3-7 m), sans qu'il y ait eu besoin d'une période de froid intense et long. La datation de ces grès cloutés à 14.180 ans BP correspond au Dryas ancien qui est un dernier refroidissement à la fin de la dernière glaciation.

Conclusions

La datation des Calcites de Fontainebleau et des calcites sableuses en général n'avait jamais été effectuée et a été obtenue pour la première fois ici. Ces datations ont complètement renouvelé l'intérêt de ces calcites : d'objet de collection, elles passent à des traceurs paléo-environnementaux du Quaternaire de nos régions.

Les datations ont montré une totale indépendance entre l'âge des calcites sableuses et l'âge des formations sédimentaires qui les contiennent. Les calcites sableuses sont toutes d'âge Pléistocène et montrent une corrélation très forte avec les phases de refroidissement des périodes glaciaires.

Les calcites sableuses sont liées aux paléoenvironnements et aux paléopaysages périglaciaires du Bassin de Paris au Pléistocène. Ce sont des traceurs des conditions paléo hydrologiques qui ont prévalu pendant les périodes glaciaires. Elles marquent en particulier la position des nappes aquifères à l'époque de leur précipitation. Ainsi, il est possible d'apprécier l'abaissement du niveau des nappes depuis leur formation et la mettre en relation avec l'approfondissement des vallées adjacentes. Elles constituent un outil nouveau pour quantifier l'évolution des paysages quaternaires, en particulier d'approcher les vitesses d'incision des vallées, du recul de l'escarpement d'un plateau, de calibrer des pulsions d'érosion sur des variations climatiques, etc.

Pour en arriver là, il faut commencer par faire l'inventaire des occurrences de calcites sableuses sur le terrain, celles des collections n'étant que d'un intérêt limité car leur lieu de récolte n'est généralement pas connu avec précision et la profondeur de prélèvement n'est quasiment jamais mentionnée.

Remerciements

Aux Naturalistes de la Vallée du Loing et du Massif de Fontainebleau (ANVL) et aux Naturalistes Parisiens (NP) pour m'avoir obligé, année après année, à me « remuer » et à imaginer comment aller plus avant avec l'excursion géologique annuelle que je proposais pour donner de la cohérence à toutes ces affaires dispersées… C'est aussi à cela que tient le progrès d'une recherche qui est toujours quelque part une œuvre partagée où les discussions fertilisent les idées. A Jean-Pierre Galerne de l'ONF de m'avoir indiqué les affleurements du « Cuvier Chatillon » et à Marie-Nieves Liron pour les commentaires d'une première version de la note.

Bibliographie

Alonso-Zarza A.M., 2003. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews*, **60** (3) : 261-298.

Billhot M., Boulliard J.-C., Fargeat M. & Melaye J.-P., 1986. Les Calcites de Fontainebleau. *Monde et Minéraux*, **75** : 48-55.

Brousse A., 2003. Les cristaux de calcite des sables de Fontainebleau. *SAGA Information*, **228** : 12-17.

Chouchoud I., 2008. Les isotopes stables de l'oxygène et du carbone dans les spéléothèmes : des archives paléoenvironnementales. *Quaternaire*, **19** (3) : 275-291.

Cuvier G. & Brongniard A., 1811. *Essai sur la géographie minéralogique des environs de Paris, avec une carte géognostique, et des coupes de terrain*. Baudouin, Impr. Inst. Impérial France, Paris, 278 p.

Delesse A.E.O.J., 1853. Sur la proportion de sable mélangé à la chaux carbonatée de Fontainebleau. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **2**, XI : 55-57.

Dobinski W., 2012. Permafrost and the contemporary meaning of the term and its consequences. *Bulletin of Geography – Physical Geography Series*, **5** : 29–42.

Dollfus G.-F., 1913. Excursion de la Société géologique de France à Darvault, près Nemours, le 20 juin 1913. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **4**, XIII : 432-436.

Plaziat J. C. & Freytet P., 1978. Le pseudomicrokarst pédologique : un aspect particulier des paléopédogenèses développées sur les dépôts calcaires lacustres dans le Tertiaire du Languedoc. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, **286** : 1661-1664.

Gaudant J., 2004. Lieux de Mémoire Géologiques du Bassin de Paris et protection du patrimoine Naturel. *Bulletin Inf. Géol. Bass. Paris*, **41** : 3-27.

Guillemin C., 1978. Evolution de la « minéralogie des gens du monde ». *Bull. Minéral.*, **101** : 124-132.

Janet L., 1894. Sur la composition chimique des grés stampiens du Bassin de Paris. *C.R. Somm. Soc. géol. France*, **3**, 22 : 161-164.

Lacroix A., 1901. *Minéralogie de la France et de ses colonies : description physique et chimique des minéraux. Etude des conditions géologiques de leurs gisements*. Paris, Béranger, tome III, 816 p.

Lassone (De) J.M.F., 1775. Nouvelles observations sur les grès cristallisés, faisant suite du mémoire sur les grès, en général & particulièrement sur ceux de Fontainebleau. *Mém. Académie Royale des Sciences* : 68-74.

Lassone (De) J.M.F., 1777. Troisième mémoire sur les grès de Fontainebleau ou analyse de ces pierres et principalement des grès cristallisés. *Mém. Académie Royale des Sciences* : 43-51.

Löffler I., 1999. Vorkommen von Sandcalciten in Frankreich. https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Sandcalcit/Sandcalcite%20in%20Frankreich.

Löffler I., 2012. Vorkommen von Sandcalciten und Konkretionen in Deutschland. http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Sandcalcit/Sandcalcite%20in%20Deutschland.

Martel E.A., 1910. L'érosion des grès de Fontainebleau. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, **XXI**, 127 : 1-37.

Neutkens H., Löffler I. & Wilson W.E., 2014. Sand calcite from Fontainebleau, France. *The Mineralogical Record*, **45** : 439-451.

Obrochta S.P., Yokoyama Y., Morén J. & Crowley T.J., 2014. Conversion of GISP2-based sediment core age models to the GICC05 extended chronology. *Quaternary Geochronology*, **20** : 1-7.

Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.M., Basile I., [...] & Stievenard M., 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399** (6735) : 429-436.

Rome de l'Isle J.-B.L., 1783. *Cristallographie, ou Description des formes propres à tous les corps du règne minéral, dans l'état de combinaison saline, pierreuse ou métallique*. Paris, 4 vol.

Thiry M., Panziera J.P. & Schmitt J.M., 1984. Silicification et désilicification des grès et des sables de Fontainebleau. Evolutions morphologiques des grès dans les sables et à l'affleurement. *Bull. Inf. Géol. Bassin Paris*, **21** (2) : 23-32.

Walther J., 1924. *Das Gesetz der Wüstenbildung in Gegenwart und Vorzeit*, 4. Auflage, Quelle & Meyer, Leipzig, pp. 72-75.



Cristallaria de Calcite de Fontainebleau,
carrière du « Mont Sarrasin », Puiselet (77).
Cliché : M. Thiry.

M. Thiry
Ecole des Mines, Géosciences, 35 rue St Honoré, 77305 Fontainebleau
<medard.thiry@mines-paristech.fr>