

Dans le bassin oligocène de Marseille et ses environs

Carbonates et dolomie en Provence : exploitation et géologie

Le 16 novembre 2023, le district Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse de la Sim organisait une journée technique centrée sur la dolomie avec, au programme, visites d'installations et conférences dans les locaux de l'Unicem Paca-Corse à Aix-en-Provence. Sandra Rimey, secrétaire générale de Minéraux Industriels France, est intervenue pour présenter les carbonates et les calcaires, puis Patrick Gaviglio, ex-enseignant universitaire en géologie, a pris le relais pour décrire l'origine de la présence de dolomie dans le site du Jas de Rhodes.

La première partie de la matinée a été consacrée à la visite de la carrière Samin (groupe Saint-Gobain) située au Jas de Rhodes, dans la commune des Pennes Mirabeau, aux portes de Marseille. Après un accueil chaleureux et une présentation des activités de la Samin par Hadia Gérardin et Vincent Loubert, une visite de la carrière a permis d'apprécier les techniques d'exploitation et de stockage des produits en fonction de la qualité des roches et de leur utilisation finale.

Ensuite, le groupe a été reçu à Ensues-la-Redonne par Pierre-Olivier Franzini, de Lhoist, où a été présenté le fonctionnement des fours servant à la fabrication des différents chaux en fonction de leur utilisation. Lhoist est un groupe international, largement implanté en France depuis 1926, avec 16 usines. C'est un acteur important de la production de chaux fran-

çaise qu'il élabore à partir de calcaires purs. La chaux est indispensable à la production de l'acier, à l'épuration des fumées industrielles, de l'eau et au traitement des sols. Les produits calciques sont fondamentaux dans l'agriculture, le verre, le génie civil, la construction, la production des papiers de grande qualité et aussi la production de sucre.

L'après-midi, les participants à cette journée technique de la Sim ont été accueillis dans les locaux de l'Unicem Paca Corse, à Aix-en-Provence. Deux conférences ont été données, d'abord sur les carbonates et les calcaires par Sandra Rimey, secrétaire générale de Minéraux Industriels France (MI-F), puis par Patrick Gaviglio, ex-enseignant universitaire en géologie et membre du district PACA Corse, sur l'origine de la présence de dolomie sur le site du Jas de Rhodes.

Les voici présentées l'une après l'autre.



Participants à la journée technique organisée par le district Provence-Alpes-Côte d'Azur et Corse de la Sim.

DR



Les carbonates et les calcaires, par Sandra Rimey

Les carbonates, qu'est-ce que c'est exactement en tant que minéraux, en tant que roches carbonatées ? Où trouve-t-on ces ressources naturelles en France ? Avant d'explorer plus en détail les carbonates, rappelons d'abord quelques principes fondamentaux en minéralogie et en géologie.

Un minéral est défini par sa composition chimique et sa structure cristalline, ce qui signifie qu'il s'agit d'un composé naturel solide cristallisé qui associe un ou plusieurs éléments chimiques. Par exemple, l'or est représenté par le symbole Au, le diamant et le graphite par C, et le quartz par SiO_2 (composé de silicium et d'oxygène), pour n'en citer que quelques-uns. On recense environ 5 500 minéraux, mais seuls certains d'entre eux revêtent une importance significative.

En ce qui concerne les roches, elles sont constituées d'une association naturelle de plusieurs minéraux. Par exemple, le granite est formé de quartz, de feldspath et de mica. Il existe plusieurs milliers de types de roches que l'on peut classer en trois catégories : les roches magmatiques (comme le granite et le basalte), les roches sédimentaires (comme les sables, les calcaires et les argiles), et les roches métamorphiques (comme les schistes et les marbres).

Les minéraux, quant à eux, sont classés en neuf catégories minéralogiques en fonction de leur composition chimique : éléments natifs – sulfures et sulfosels – halogénures – oxydes et hydroxydes, carbonates et nitrates – borates – sulfates, sélénates, tellurates, chromates, molybdates et tungstates – phosphates, arséniates et vanadates – silicates – composés organiques.

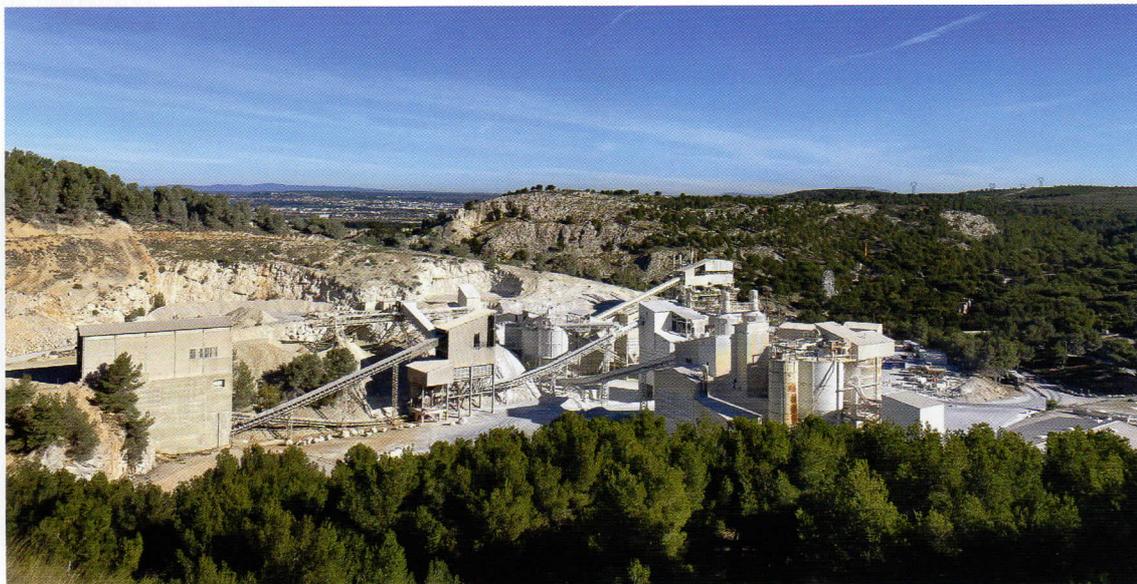


Présentation de la carrière Samin, au Jas de Rhodes, dans le massif de la Nerthe, par Hadia Gérardin et Vincent Loubert.



A Ensues-la-Redonne, Pierre-Olivier Franzini (Lhoist), a décrit le fonctionnement des fours servant à la fabrication des différents chaux en fonction de leur utilisation.

Usine Lhoist d'Ensuès-la-Redonne. Elle est approvisionnée en partie par la carrière de Samin et produit de la chaux dolomitique et de la chaux calcique.



JC Lazarewicz

Aragonite, calcite et dolomite

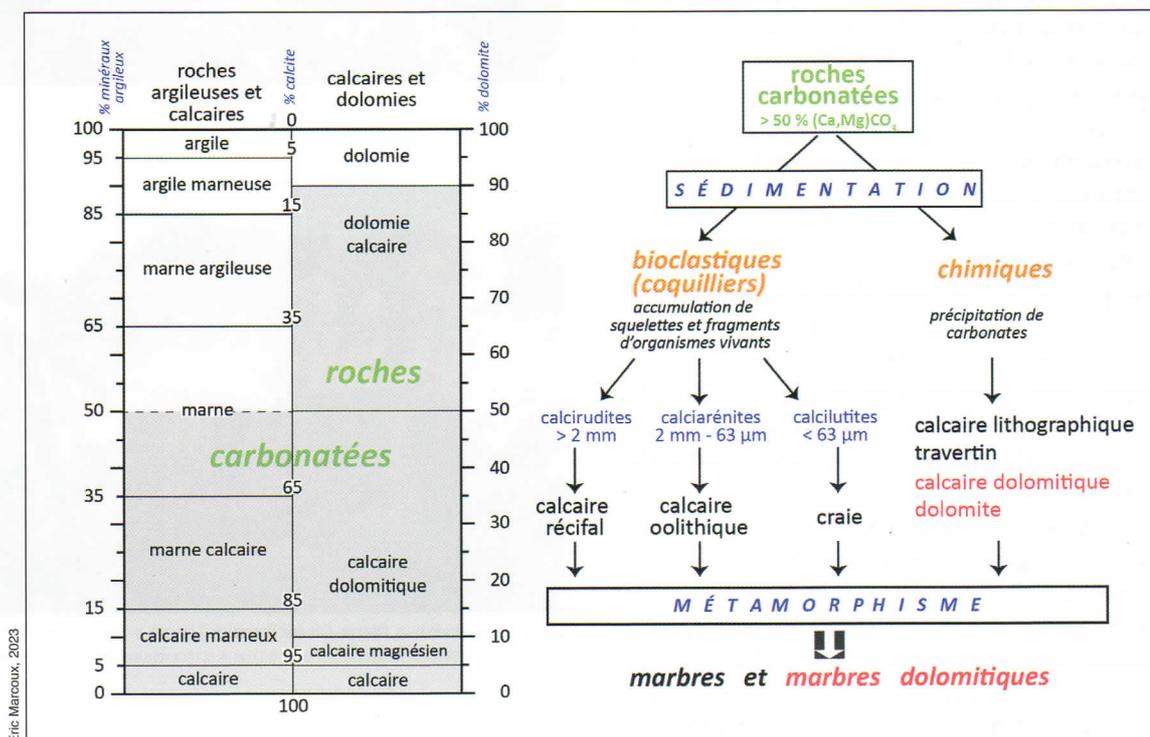
Dans la classe des carbonates, on trouve trois groupes principaux, basés sur leur composition chimique et leur système cristallin : l'aragonite, la calcite et la dolomite. La caractéristique distinctive des carbonates réside dans la présence de l'ion $\text{CO}_3^{(2-)}$, où un atome de carbone est entouré de manière équilatérale par des atomes d'oxygène. Un exemple bien connu de carbonate est la calcite qui est un carbonate de calcium (CaCO_3). La calcite est extrêmement répandue et largement utilisée dans l'industrie. Elle constitue un composant majeur, voire exclusif, de certaines roches sédimentaires, telles que la craie et le marbre, ainsi que des coquilles d'animaux marins, des escargots et du corail. Le groupe minéralogique de la calcite comprend aussi la sidérite FeCO_3 et la magnésite MgCO_3 .

L'aragonite, également un carbonate de calcium (CaCO_3), est beaucoup plus rare que la calcite et se trouve, par exemple, dans les stalactites et les stalagmites des grottes. Enfin, la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) est un carbonate double couramment utilisé dans l'industrie. Son groupe minéralogique comprend également d'autres minéraux, tels que l'ankérite ($\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) et la kutnohorite ($\text{CaMn}(\text{CO}_3)_2$).

Les roches carbonatées

Concernant les roches carbonatées, il s'agit de roches sédimentaires ou métamorphiques qui contiennent plus de 50 % de carbonates, principalement de la calcite ou de la dolomite. Les deux principales catégories de roches carbonatées sont les calcaires, composés principalement de calcite (CaCO_3), et les

▼ GÉOLOGIE des roches carbonatées (à gauche) et formation des carbonates



Eric Marcoux, 2023

dolomies, composées surtout de dolomite (CaMg (CO₃)₂). Ces roches représentent environ 4 % de la croûte terrestre et quasiment 20 % des séries sédimentaires continentales.

Schématiquement, les calcaires peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur composition. Les calcaires purs contiennent plus de 95 % de calcite, tandis que les calcaires magnésiens contiennent 5 à 10 % de dolomite. Les calcaires dolomitiques ont une teneur en dolomite comprise entre 10 % et 50 %, tandis que les calcaires marneux renferment de 5 à 15 % d'argile. Les craies, quant à elles, sont composées à plus de 90 % de coquilles calcitiques de microorganismes, appelés coccolithophoridés, liées par un ciment de calcite.

Les dolomies peuvent être classées en deux catégories : les dolomies pures qui contiennent plus de 90 % de dolomite, et les dolomies calcaires qui ont une teneur comprise entre 50 % et 90 %.

Les marbres sont des roches carbonatées qui résultent de la transformation de roches carbonatées par un processus de métamorphisme. Ces marbres sont souvent zonés et sont connus pour leur couleur blanche. On peut les distinguer en marbres issus de calcaires et en marbres issus de dolomies, bien qu'il existe une transition graduelle entre les deux. Le terme de "calcaire marbrier" est couramment utilisé dans l'industrie pour désigner une roche qui peut être polie et utilisée à des fins décoratives.

Ces roches carbonatées se forment dans des bassins sédimentaires marins, sur la plate-forme continentale, mais aussi en domaine marin franc, jusqu'à la limite de cristallisation des carbonates ou profondeur de compensation des carbonates (CCD), qui se situe autour de 4 500 mètres de profondeur. On peut également les trouver dans les lacs continentaux.

Les applications

Les roches carbonatées (craies, calcaires, dolomies, marbres) offrent une diversité de possibilités. Selon sa nature et le type de transformation, la pierre peut être utilisée brute pour ses caractéristiques physiques et mécaniques ou elle peut être transformée pour ses caractéristiques physico-chimiques.

Matériaux de construction

Comme matériaux de construction, on retrouve :

- les granulats : environ 3 500 carrières, autour de 414 Mt en 2020 dont 93,3 Mt en roches calcaires. Les applications sont principalement le bâtiment et les travaux publics dont le génie civil ;
- les roches ornementales et de construction : les usages sont essentiellement la construction et le funéraire.

Les roches et minéraux pour l'industrie

Dans les applications dites industrielles, ce sont les caractéristiques physico-chimiques ou chimiques qui décident des marchés.



JC Lazarewicz

Intervention de Sandra Rimey sur les carbonates et les calcaires.

■ PRODUCTION nationale de granulats de carrières et d'origine marine (en Mt)

	2019	2020	% 2020/2019	Structure 2020
ROCHES MEUBLES	126,7	117,9	-6,9 %	39 %
▪ alluvionnaires	99,5	92,5	-7,0 %	31 %
▪ granulats marins*	5,5	5,4	-1,8 %	2 %
▪ autres sables	21,7	20,0	-7,8 %	6 %
ROCHES MASSIVES	199,0	183,6	-7,7 %	61 %
▪ roches calcaires	99,6	93,3	-6,3 %	31 %
▪ roches éruptives	99,4	90,3	-9,2	30 %
TOTAL	325,7	301,5	-7,4 %	100 %

* Production de granulats marins réalisée à partir de concessions françaises.

■ PRODUCTION nationale des roches ornementales et de construction (ROC) en 2020 (source : Unicem)

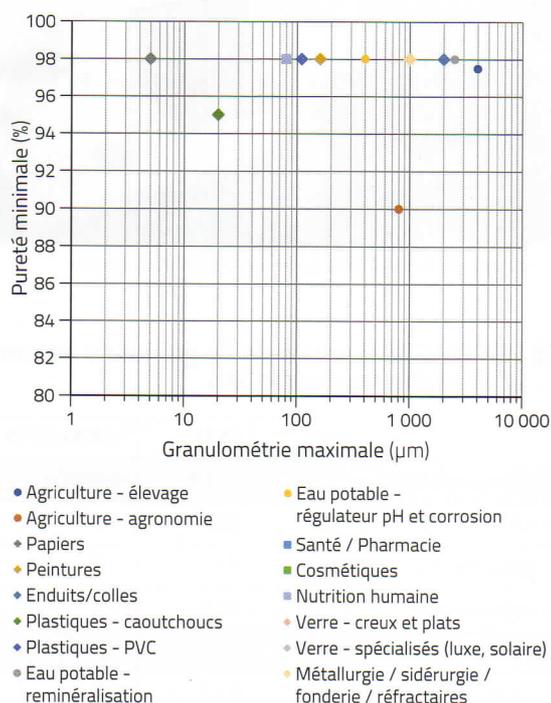
	Total extraction en m ³	Blocs équarris en m ³	Sciage en m ³	Produits finis en milliers d'euros
Pierres calcaires	301 900	163 800	1 028 800	104 097
Pierres marbrières				
Marbre				
Granit	160 500	109 500	54 700	221 680
Grès	9 282	5 100	13 100	4 531
Lave	*	*	*	6 933

* Secret statistiques

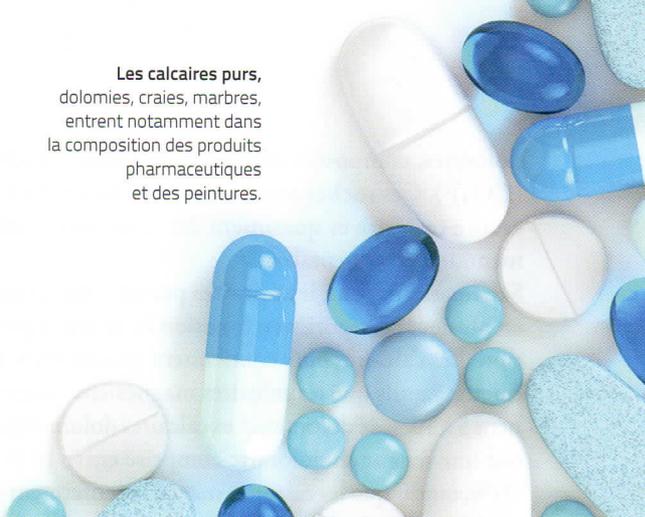
■ UTILISATION des produits. Chiffre d'affaires HT en milliers d'euros (Source : Unicem)

	Bâtiment	Voirie	Funéraire
Pierres calcaires	88 218	14 749	1 130
Granit	53 440	27 707	140 533
Grès et lave	12 566	0	42

▼ GRANULOMÉTRIE et pureté requises de la calcite et de la dolomite



Les calcaires purs, dolomies, craies, marbres, entrent notamment dans la composition des produits pharmaceutiques et des peintures.



Picturestock.adobe.com

Les carbonates pour charges minérales diverses, chimie, verrerie et chaux sont exploitées dans 60 carrières pour une production totale de 24 Mt (hors usages cimentiers), dont 6,2 Mt pour la chaux (à convertir pour avoir le tonnage extrait), ce qui en fait le minéral industriel le plus extrait à l'échelle nationale. À cette production il faut ajouter celle de dolomite, le carbonate de calcium et magnésium, destinée aussi à des usages variés. Selon *Elementarium* (2022), la France aurait produit 124,9 kt de PCC en 2021 (ouvrage paru en 2023, Eric Marcoux, SGF/MI-F).

Pour le ciment, l'industrie française en produit 19 Mt par an (à convertir pour avoir le tonnage extrait) grâce à 29 cimenteries employant 4 500 personnes.

Les marchés

Les carbonates de calcium et de magnésium, sous forme brute, sont utilisés dans de nombreux secteurs industriels en tant que minéraux de charge ou produits de base pour la fabrication de dérivés, tels que le bicarbonate de sodium. Lorsqu'ils sont cuits, ils servent de matière première essentielle dans la production de ciments et de chaux¹.

Cas de la chaux

Le premier critère de classification de la chaux est la composition chimique du produit de base, qui permet de définir deux grands groupes :

- les chaux aériennes : à partir de calcaires renfermant de 65 à 99 % de $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$, plus quelques autres substances, principalement des oxydes (voir plus loin), sans argile ;
- les chaux hydrauliques : à partir de calcaires renfermant de 40 à 95 % de CaCO_3 plus quelques autres substances, principalement des oxydes, avec de l'argile (5 à 22 %, en général 15 à 20 %).

Cas des carbonates de calcium et de magnésium bruts

Ces caractéristiques comprennent :

- la taille des particules (granulométrie) ;
- la pureté chimique ;
- la présence d'éléments indésirables (arsenic, fer...) ;
- la luminosité (blancheur).

En résumé, le ciment et la chaux hydraulique sont utilisés dans le domaine de la construction. Les carbonates et la chaux calcique ont des usages très variés : environnement (traitement de l'eau et des fumées), métallurgie, chimie, agriculture, TP, l'agriculture, pharmacie (ostéoporose), hygiène et cosmétique, peintures, papier, plasturgie etc. Malgré sa banalité apparente, le calcaire demeure un élément essentiel !

1. La classification des produits cuits, frittés ou fondus dépend de la température de traitement, allant de la calcination en four à des températures plus élevées aboutissant à des oxydes et hydroxydes de calcium et de magnésium utilisés dans diverses applications. On distingue :

- les produits cuits, dont la chaux, obtenus par calcination en four ($800 < T^\circ\text{C} < 1\,250$) ;
- les produits frittés obtenus par frittage ($1\,300 < T^\circ\text{C} < 2\,000$). Le processus provoque la fusion partielle des éléments de carbonates donnant un aspect aggloméré ;
- les produits fondus obtenus par électrofusion ($T^\circ\text{C} > 2\,000$).

(Source : BRGM, 2017)

La dolomie du Jurassique supérieur du Jas de Rhodes, cadre géologique et formation, par Patrick Gaviglio

Le gisement est situé dans le chaînon de la Nerthe, relief qui borde au nord la rade de Marseille. Ce chaînon, constitué de terrains jurassiques et crétacés, a une structure anticlinale dont le flanc sud est affecté par un chevauchement. Dans le secteur du Jas de Rhodes, le flanc sud de l'anticlinal est recouvert par un autre chevauchement à vergence nord, celui de la chaîne de l'Étoile, et le flanc nord est renversé. L'exploitation de la dolomie se trouve dans cette partie du pli. Cette situation est illustrée par une coupe du versant nord de la Nerthe.

La dolomie est une roche carbonatée contenant plus de 50 % de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Elle peut se former par évaporation et précipitation (dolomies primaires), ce qui est un cas très rare ou par un processus de transformation d'un calcaire préexistant, la dolomitisation (dolomies secondaires). La dolomitisation est la conséquence d'un phénomène d'épigenèse qui, par diffusion à l'échelle cristalline, aboutit à la substitution d'atomes de calcium par des atomes de magnésium. Cette transformation, qui respecte les structures cristallines initiales, peut se produire lorsque des calcaires sont imprégnés par des eaux riches en magnésium lors de la diagenèse. La dolomitisation peut être qualifiée de précoce ou tardive selon qu'elle affecte un calcaire non lithifié, très poreux, ou un calcaire lithifié et fracturé.

La dolomie exploitée au Jas de Rhodes forme un ensemble assez massif, de couleur grise, d'environ 80 m d'épaisseur, présentant une altération pulvérulente classique. Elle résulte, selon les travaux de F. Gisquet (2012), d'une dolomitisation précoce qui a affecté une formation calcaire marine d'âge Oxfordien supérieur à Kimméridgien inférieur (160 – 157 Ma) appartenant à la plateforme carbonatée provençale qui s'est mise en place à la fin du Jurassique. On la retrouve dans la



chaîne de l'Étoile et à proximité immédiate de Marseille (formation du Vallon de Toulouse).

Patrick Gaviglio a expliqué l'origine de la présence de dolomie sur le site du Jas de Rhodes.

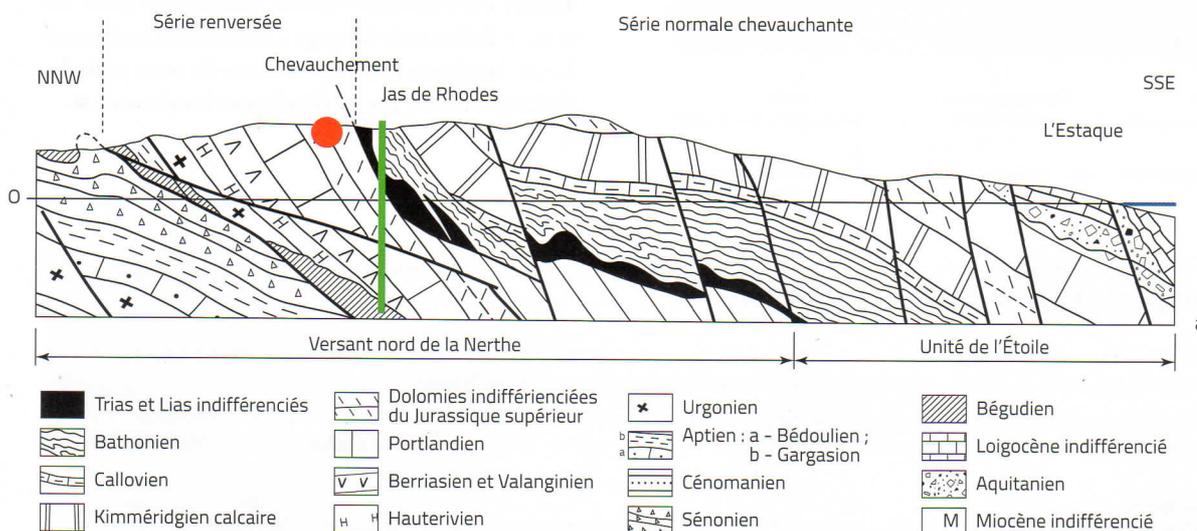
Du calcaire à la dolomie

La formation calcaire initiale est identifiable grâce à l'observation de fantômes de particules sédimentaires comme des oolites ou des bioclastes (débris de fossiles), et de plans de stratification (limites de bancs ou litages obliques) que la dolomitisation n'a pas complètement effacés. Il s'agissait d'un ensemble sédimentaire typique de plateforme: calcarénite riche en oolites et en débris d'organismes carbonatés. Ce milieu de sédimentation devait être peu profond (moins de 200 m) et assez agité. Une période de non-sédimentation a succédé au dépôt de cette formation, incluant une émergence qui a débouché sur une longue phase d'altération et de dissolution. Le retour de la mer a entraîné l'installation de zones soumises à des alternances d'invasion marine et d'évaporation (régime de sebkha) où se sont formées des saumures riches en magnésium qui se sont infiltrées dans les calcaires rendus plus perméables par l'altération et la dissolution. C'est ce qui a permis l'épigenèse des cristaux de calcite en dolomite.

Évolution de la roche soumise à un enfouissement au cours du Crétacé

Le dépôt des calcaires de plateforme du Crétacé inférieur, puis des séries marines et, ensuite, continentales

▼ COUPE GÉOLOGIQUE montrant la situation des dolomies exploitées dans le flanc nord renversé de l'anticlinal de la Nerthe, au front du chevauchement de l'unité de l'Étoile



Barré oblique (coupe a seulement) : matériel Nerthe septentrionale indifférencié
Double traits verticaux : forages

Carrière Samin,
vue vers
le nord-est.

du Crétacé supérieur, a eu pour conséquence une nouvelle phase d'évolution de la dolomie qui a subi l'influence d'une couverture dont l'épaisseur a dû atteindre 1 000 m au Crétacé supérieur. Cette phase s'est traduite par des phénomènes de compaction, de dissolution et de recristallisation. La porosité initiale élevée, du fait des conditions d'altération météorique du calcaire originel, a été réduite par cimentation calcitique. Toutefois, une partie non négligeable de la porosité a été préservée par la présence de fluides saturant la roche. En outre, des surpressions de fluides ont pu provoquer localement des bréchifications d'échelle millimétrique à centimétrique.

Conséquences des grandes déformations du début du Tertiaire

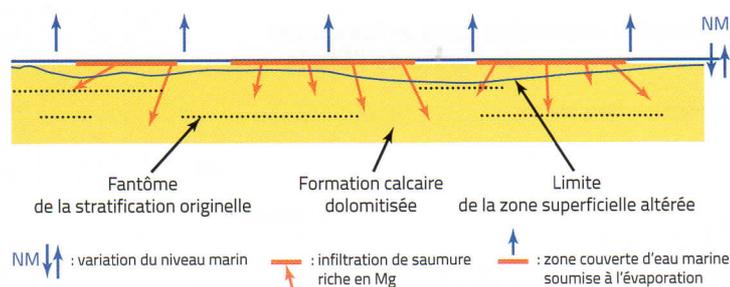
L'ensemble de la couverture sédimentaire provençale a subi les plissements et chevauchements de la phase tectonique pyrénéo-provençale. C'est dans ce contexte de

raccourcissement généralisé que, dans la région de Marseille, les terrains du Jurassique supérieur ont été déformés et exhumés. La formation dolomitique a été fragmentée en trois parties appartenant aux massifs de Carpiagne, de l'Étoile et de la Nerthe. La dolomie du Jas de Rhodes appartient à ce dernier : elle affleure dans le flanc nord renversé de l'anticlinal qui forme aussi le flanc sud du synclinal de l'étang de Berre. Fracturation, cisaillements et écaillages témoignent de l'intensité des déformations qui ont affecté cette roche.

Évolution morphologique au cours des 20 derniers millions d'années

La dolomie du Jas de Rhodes, probablement peu affectée par l'extension qui s'est manifestée au moment de la création du bassin oligocène de Marseille, a été soumise à l'action des agents météoriques. Fissuration et érosion ont conditionné cette évolution superficielle. La dissolution de la fraction calcitique originelle ou d'une partie des ciments formés postérieurement, a contribué à la fragilisation de la roche. Celle-ci a acquis le relief ruiniforme classique dans ce type de roche dû à la désagrégation aisée de ce matériau très poreux. Il tend à donner des sables enrichis en dolomite, minéral insoluble dans les conditions ordinaires. Cette altération, qualifiée de pulvérulente, est particulièrement développée dans les zones de failles où le broyage a contribué à la destruction de la texture initiale. Au cours de cette période, une karstification a pu se développer localement. ■

▼ DOLOMITISATION de la formation calcaire par infiltration de saumures riches en Mg formées par évaporation de lagunes d'eaux marines



Références utilisées par Patrick Gaviglio

- Floquet M., 2020. Les fluctuations de la mer sud-provençale au Jurassique, de $-201,3 (\pm 0,2)$ à $-145 \text{ Ma} (\pm 0,8)$, in Bourideys J. [coord.], 2020 – La géologie des Bouches-du-Rhône, Roches et paysages remarquables. BRGM éditions, Orléans : 21 – 34.
- Gisquet F., 2012. Les drains dolomitiques super-K : géométries, hétérogénéités-réservoirs, origines. La formation Khuff en subsurface (Permo-Trias, Qatar-Iran) et un analogue à l'affleurement (Jurassique supérieur, Provence – France). Thèse de doctorat de Aix – Marseille Université, 533 p.
- Version téléchargeable : https://agse-geologues.fr/documents/docs_sciences/theses/2012_F.Gisquet-VersionLimit%C3%A9Jur.Sup.Prov.Nov.2012.pdf