



HAL
open science

La “ signature ” diagénétique des calcarénites littorales de Malia : décryptage géochimique

Stoil Chapkanski, Sylvie Müller Celka

► To cite this version:

Stoil Chapkanski, Sylvie Müller Celka. La “ signature ” diagénétique des calcarénites littorales de Malia : décryptage géochimique. 2024, <10.58079/129b2>. <halshs-05534201>

HAL Id: halshs-05534201

<https://shs.hal.science/halshs-05534201v1>

Submitted on 3 Mar 2026

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

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



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0 - Attribution - Non-commercial use - ShareAlike - International License

La « signature » diagénétique des calcarénites littorales de Malia : décryptage géochimique

 archeorient.hypotheses.org/30436

Stoil Chapkanski et Sylvie Müller Celka

6 septembre 2024



Le littoral de la région de Malia, [au nord-est de la Crète](#), se caractérise par une alternance de côtes sableuses et de côtes rocheuses constituées de calcarénites sur un substrat calcaire. Les calcarénites sont des dépôts sableux d'origine éolienne et marine (plages et dunes) solidifiés par la cimentation naturelle de dépôts sableux carbonatés sous l'effet du ruissellement. Ces formations relativement tendres, faciles à découper et à transporter par voie de mer, ont été exploitées pour fournir de la pierre à bâtir dès l'âge du Bronze crétois, à la période dite « minoenne » (Müller et Dalongeville 2009). On trouve en effet cette roche sous forme de blocs ou de dalles dans la plupart des édifices de la ville minoenne de Malia à partir du Bronze moyen (env. 2000-1700 av. J.-C.) (fig. 1), et des traces d'exploitation ont bien été repérées en de nombreux points du rivage à proximité du site archéologique de Malia, parfois même immergées ou semi-immersées, car le niveau marin actuel est supérieur de plusieurs mètres à celui de la période minoenne (fig. 2).



Fig. 1 : Le mur sud de la Crypte Hypostyle de Malia, détruite vers 1700 av. J.-C. (photo S. Müller Celka)



Fig. 2 : Découpes semi-immergées de la carrière de Malia Bay Beach (93.3) (photo S. Müller Celka)

Deux billets précédents ont déjà traité respectivement de la [découverte des carrières de calcarénite](#) et du [problème de leur datation](#). Dans ce dernier, était abordée la question de savoir s'il était possible de faire un lien entre les différentes carrières et les édifices datés par le mobilier archéologique. On y expliquait que seule une étude comparative de la composition chimique des roches permettrait de démontrer un lien individuel entre carrières et édifices, à condition toutefois de pouvoir d'abord identifier la « signature » de chaque carrière, ou, au moins, groupe de carrières. En effet, les similitudes de forme, de dimensions et de particularités physiques entre les traces d'exploitation et les blocs mis en œuvre dans le bâti fournissent quelques indices mais aucune certitude, en particulier du fait des volumes exploités qui, par définition, ont disparu des carrières. Or cette étude comparative est longtemps restée irréalisable en raison de l'interdiction par les autorités archéologiques grecques de prélever des échantillons sur des édifices restaurés.



Fig. 3 : Stoil Chapkanski positionne le p-XRF Niton XL5 avant de se retirer hors du périmètre de sécurité pour lancer la mesure d'une dalle de calcarénite, en bordure sud-ouest du quartier Mu de Malia (photo S. Müller Celka).

Aujourd'hui cependant, la technologie de la fluorescence des rayons X embarquée dans un spectromètre portable (p-XRF) permet d'analyser la composition élémentaire d'un matériau sans prélèvement ni destruction. En 2022, le laboratoire Archéorient a fait l'acquisition d'un p-XRF Niton XL5 Plus fabriqué par Thermo Scientific (Waltham, Massachusetts, États-Unis) mutualisé au sein de la plateforme [OMEAA](#), ce qui a permis aux auteurs de ce billet de programmer en septembre 2022 une campagne de mesures à Malia, à la fois sur les calcarénites littorales et sur les blocs de ce matériau *in situ* dans le site archéologique (fig. 3). Nous présentons ici les résultats d'une première étape sur le chemin de la détermination des carrières-sources de la ville minoenne.

Ce travail repose au départ sur deux hypothèses, l'une thématique et l'autre méthodologique :

- Le contexte géomorphologique et sédimentologique des carrières littorales identifiées à l'ouest et à l'est du site archéologique de Malia diffère suffisamment pour qu'elles soient discriminantes sur la base des traceurs géochimiques qui les composent. En effet, la formation des dépôts de calcarénites peut avoir été influencée, d'une part, par le déplacement de sédiments le long de la dérive littorale, orientée d'ouest en est, et d'autre part, par l'environnement immédiat des carrières, soit rocheux (substrat de petites falaises calcaires), soit sableux (substrat de *terra rossa* ou autres formations superficielles). On observe que les carrières à l'ouest du site archéologique sont plutôt placées dans des portions de côte sableuse alors que celles à l'est du site occupent de petites falaises littorales.

- L'application de la spectrométrie de fluorescence des rayons-X, réalisée par un spectromètre portable directement sur des matériaux bruts et non-traités (impossibilité de prélever des échantillons) peut permettre de différencier les compositions élémentaires des carrières entre elles, malgré des biais liés aux variations de texture des calcarénites et à l'exposition des surfaces aux contaminants ambiants (sel, poussières, lichen...), partiellement limités par un brossage soigneux avant mesure.

Pour tester les deux hypothèses, l'idée était de comparer d'abord les mesures des carrières les plus éloignées vers l'est et vers l'ouest par rapport au site archéologique : un résultat probant serait un pré-requis pour ensuite entreprendre de différencier les autres carrières puis les blocs mis en œuvre dans le bâti du site de Malia en fonction de leurs lieux d'extraction.

L'objectif premier est de créer une base de référence des sources de calcarénite, représentative et adaptée à la zone d'étude. La base de données est constituée de mesures permettant d'évaluer, par des analyses statistiques, la capacité de discriminer la roche provenant des différentes carrières situées le long du littoral maliote (fig. 4). La précision, la sensibilité et les limites du modèle de prédiction des sources de calcarénite sont déterminées en analysant des affleurements dans différents contextes sédimentaires au sein des carrières (plages et dunes fossiles) et géomorphologiques (côte rocheuse et sableuse). Cette première étape permet l'apprentissage du modèle de prédiction et l'établissement d'une signature géochimique spécifique pour les différentes sources. La comparaison avec la composition des calcarénites taillées et utilisées dans la ville minoenne constituera une seconde étape de cette étude, qui doit permettre de découvrir de quelle(s) carrière(s) proviennent les blocs de chaque édifice mais aussi, par extension, de dater l'exploitation des carrières dans la mesure où les édifices sont datés par la stratigraphie et le mobilier qu'ils ont livré.



Fig. 4 : Carte des carrières de calcarénite identifiées de long du littoral maliote (en gras, les carrières ayant fait l'objet de mesures) (DAO S. Chapkanski)

Pendant la campagne de septembre 2022, 17 carrières de calcarénite ont été

analysées. Le spectromètre portable Niton XL5 est équipé d'un tube en or générateur de rayons x avec tension allant jusqu'à 50kV (500 μ A). L'appareil a été paramétré pour effectuer des mesures en mode nommé "minerais" Cuivre /Zinc avec quatre filtres successifs : Main (20s), High (20s), Low (20s), Light (20s). L'ensemble des filtres permet la détection des éléments chimiques allant de Mg au Pb. Chaque mesure dure 80 secondes (4x20s). Des mesures préliminaires ont permis d'évaluer le meilleur rapport temps/qualité des résultats. Durant le temps de mesure, l'appareil émet un rayonnement ionisant, ce qui nécessite une attention particulière lors de la manipulation et une mise en sécurité pour l'opérateur et les personnes à proximité.

Chaque carrière a fait l'objet de plusieurs mesures (109 au total), effectuées sur des affleurements de plages et dunes fossilisées de tailles variées et de morphologies hétérogènes. Les couleurs naturelles des roches observées vont du beige à l'ocre jaune ou rouge. En outre, des mesures complémentaires visant des « veines » de ciment, formées par des mouvements de fluides au sein de dépôts, ont été réalisées. Les données brutes ont été intégrées dans un fichier Excel. La matrice obtenue a été utilisée comme donnée d'entrée pour des analyses discriminantes, réalisées avec le logiciel SPSS IBM. Cette méthode statistique est utilisée pour déterminer les directions de la projection des données en maximisant la distance entre les groupes et minimisant la distance à l'intérieur des groupes. Elle permet de vérifier si des groupes pressentis parmi les échantillons (en l'occurrence ceux d'une même carrière ou de plusieurs carrières voisines) peuvent réellement former des classes bien différenciées en fonction de variables communes. Pour ce faire, l'analyse discriminante attribue des coefficients afin de maximiser les distances entre les groupes. La distance mesurée selon la fonction discriminante permet de classer ou non un échantillon dans un groupe pressenti et renseigné au préalable. Si les échantillons sont classés correctement dans leurs groupes pressentis, la carrière devrait alors avoir une signature chimique unique, lui permettant de se différencier des autres.

Une première analyse discriminante a permis de générer un nuage de point (fig. 5) qui met en évidence une nette distinction entre les carrières de l'ouest (en rouge, groupe 1), de l'est (en orange, groupe 2) et du centre (en vert, groupe 3, fig. 6). Selon la première fonction discriminante, les trois groupes présentent des distances de Mahalanobis intra-groupes entre 1 et 2, 1 et 3 et 2 et 3 de respectivement 3,8, 5,02, et 1,24. L'ensemble des échantillons a été classé correctement. La classification optimale s'effectue par la combinaison de Magnésium, Manganèse, Phosphore, Soufre et Silicium.

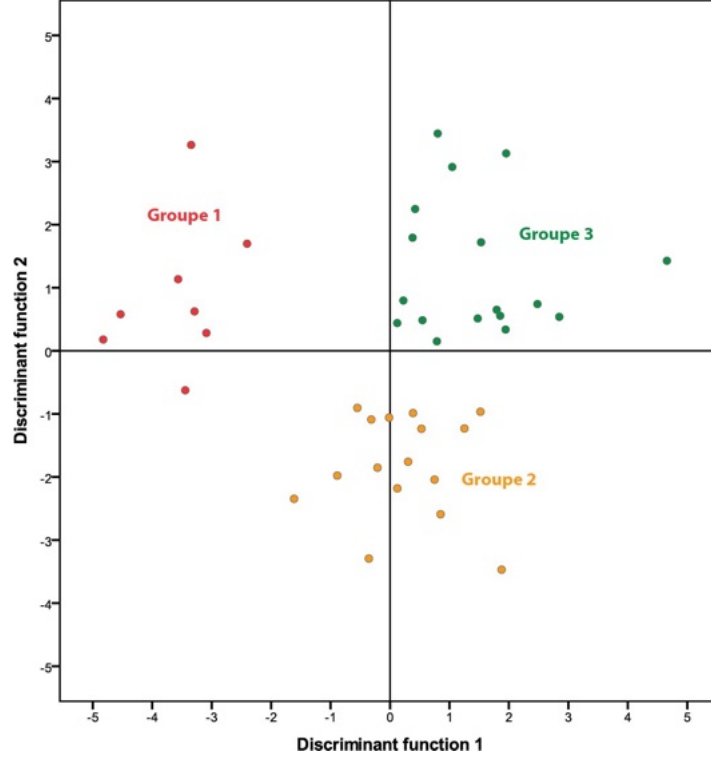


Fig. 5

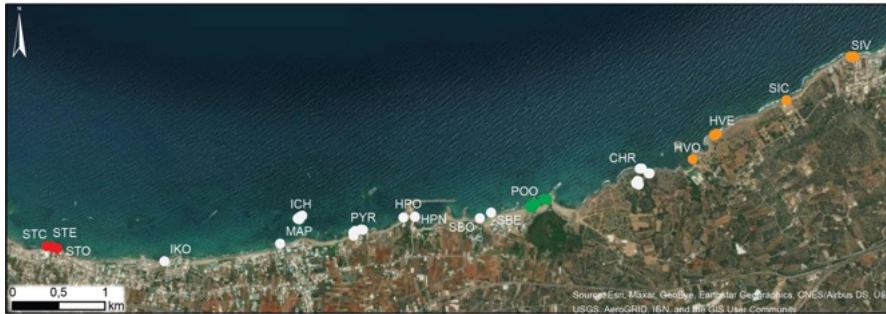


Fig. 5-6 : 3 groupes de nuages de points correspondant aux carrières situées à l'ouest (groupe 1), à l'est (groupe 2) et à proximité (groupe 3) du site archéologique de Malia

Une deuxième analyse discriminante a permis de générer un histogramme (fig. 7) qui met en évidence la séparation entre les carrières de l'ouest (en blanc hachuré, groupe 1) et celle de l'est (en orange, groupe 2, fig. 8). Selon la première fonction discriminante, la distance intra-groupes entre 1 et 2 est de 4,61. L'ensemble des échantillons a été classé correctement. La classification optimale s'effectue par la combinaison de Magnésium, Soufre et Silicium.

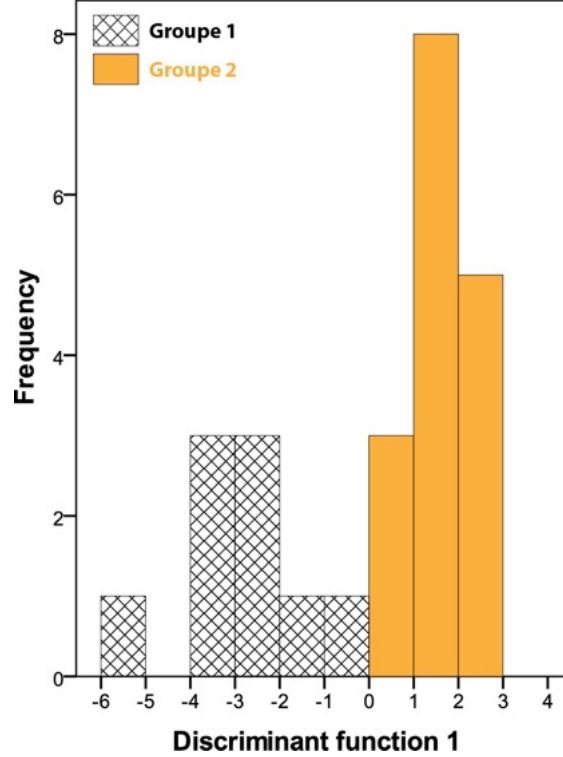


Fig.7

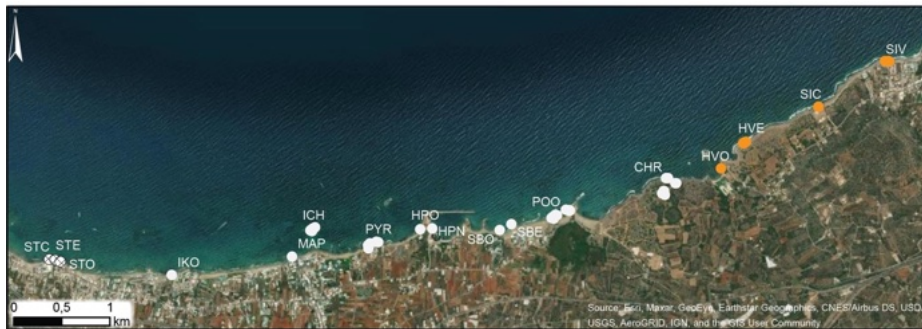


Fig. 7-8 : Histogramme mettant en évidence la séparation dans la composition chimique des carrières de l'ouest (groupe 1) et de l'est (groupe 2) du littoral maliate.

Une troisième analyse discriminante a généré un histogramme (fig. 9) qui met en évidence la distinction entre les carrières situées sur une portion de côte sableuse (en blanc hachuré, groupe 1) et le long d'une côte rocheuse (en orange, groupe 2, fig. 10). Selon la première fonction discriminante, la distance intra-groupes entre 1 et 2 est de 4,04. L'ensemble des échantillons a été classé correctement. La classification optimale s'effectue dans ce cas par la combinaison de : Arsenic, Cuivre, Magnésium, Silicium, Strontium, Yttrium et Zirconium.

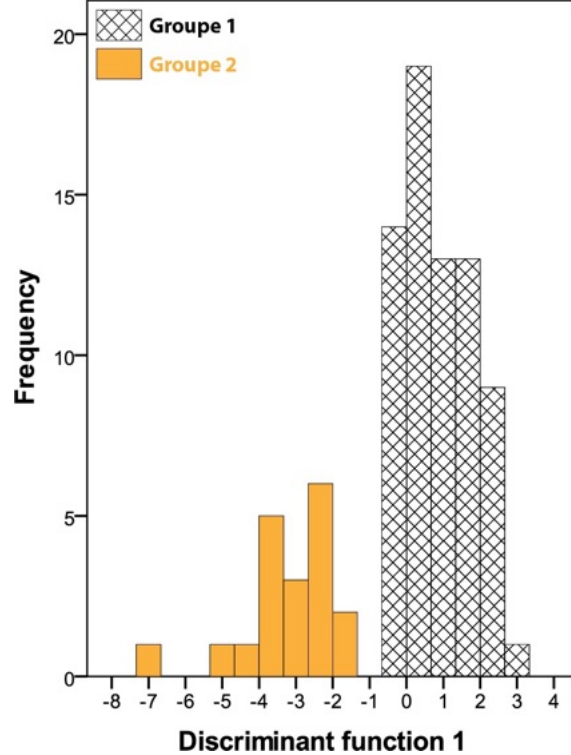


Fig. 9

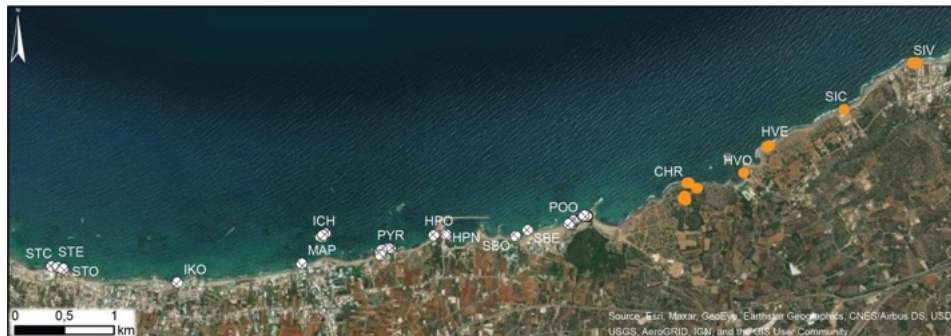


Fig. 9-10 : Histogramme mettant en évidence la séparation dans la composition chimique des carrières sur substrat sableux (groupe 1) et sur substrat rocheux (groupe 2).

En conclusion, les résultats issus de ces premières analyses ont validé les deux hypothèses de travail : ils permettent de vérifier la possibilité de différencier les lieux d'extraction des calcarénites en fonction de leur localisation géographique sur un transect est-ouest le long du littoral malite et en fonction de leur contexte géomorphologique. En effet, les carrières situées à l'est ont une composition élémentaire plus abondante en Manganèse et Silicium alors que les carrières à l'ouest semblent plus riches en Magnésium et Soufre. En outre, la composition géochimique des carrières semble varier également en fonction de des dépôts de sédiments. Les calcarénites qui se forment en contexte de plage sableuse ont une composition élémentaire plus abondante en Arsenic, Silicium, Strontium et Yttrium alors que les calcarénites en contexte de côte rocheuse sont plus riches en Cuivre, Magnésium et Zirconium.

La qualité des résultats pourrait être améliorée en prélevant de la matière et en la prétraitant par séchage et broyage afin d'obtenir une poudre homogène avant l'analyse par p-XRF. Une demande sera introduite prochainement auprès du Ministère hellénique de la Culture via l'Ephorie des Antiquités d'Héraklion pour obtenir l'autorisation de prélever des échantillons. En effet, même si ce traitement ne sera applicable qu'aux carrières et pas aux blocs de calcarénite des constructions minoennes, la comparaison

sera potentiellement plus fructueuse si on obtient un référentiel plus robuste constitué par des données plus précises sur les carrières.

A terme, lorsque la discrimination des carrières sera maîtrisée et la combinaison des variables (éléments chimiques) discriminantes connue, les mesures issues de la ville minoenne de Malia pourront être comparées avec celles obtenues sur les carrières de calcarénite dans le but de déterminer la provenance des matériaux de construction et, partant, de dater l'exploitation des carrières d'après la date de construction de l'édifice désigné par la signature diagénétique de la roche utilisée.

Remerciements

Nous souhaitons adresser nos chaleureux remerciements au laboratoire Archéorient pour le prêt du p-XRF, à l'Ecole française d'Athènes pour l'accès à ses infrastructures sur le site de Malia et pour l'obtention des autorisations de travail, et à l'Ephorie des Antiquités d'Héraklion pour ses autorisations de travail et son soutien aux recherches sur le site de Malia.

Bibliographie

Müller Celka S., Dalongeville R. 2009. Les calcarénites dunaires littorales en Méditerranée orientale : formation, propriétés, exploitation, in Ph. Jockey (éd.), ASMOSIA VIII, Maison méditerranéenne des sciences de l'homme, Paris, 143-160.

Müller Celka S. (17 janvier 2020). La découverte des carrières de calcarénite dans la région de Malia (Crète). ArchéOrient – Le Blog. <https://doi.org/10.58079/bcz8>

Müller Celka S. (7 février 2020). Les carrières de calcarénite de la région de Malia (Crète) : comment les dater ? ArchéOrient – Le Blog. <https://doi.org/10.58079/bczb>

Les auteurs

[Stoil Chapkanski](#) est géomorphologue-géoarchéologue à l'Université de Rouen Normandie, membre du laboratoire IDEES UMR 6266, référent des équipements d'analyses physico-chimiques.

[Sylvie Müller Celka](#) est archéologue, spécialiste du monde égéen protohistorique, chargée de recherche au CNRS dans le laboratoire Archéorient-UMR 5133, ancien membre de l'Ecole française d'Athènes

OpenEdition vous propose de citer ce billet de la manière suivante :

Stoil Chapkanski et Sylvie Müller Celka (6 septembre 2024). La « signature » diagénétique des calcarénites littorales de Malia : décryptage géochimique.

ArchéOrient - Le Blog. Consulté le 26 février 2026 à l'adresse <https://doi.org/10.58079/129b2>