



HAL
open science

Emploi de la pierre en Grèce antique autour du Golfe de Corinthe

Marilou De Vals

► **To cite this version:**

Marilou De Vals. Emploi de la pierre en Grèce antique autour du Golfe de Corinthe. Géochimie. Sorbonne Université, 2022. Français. NNT : 2022SORUS493 . tel-04041462

HAL Id: tel-04041462

<https://theses.hal.science/tel-04041462>

Submitted on 22 Mar 2023

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.

Sorbonne Université

École doctorale 398 – Géosciences, Ressources et Environnements

Thèse de doctorat de **Géologie**

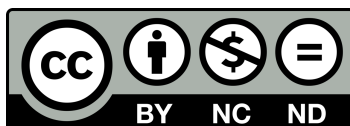
Par **Marilou de Vals**

Emploi de la pierre en Grèce antique autour du Golfe de Corinthe

Présentée et soutenue publiquement le 16 décembre 2022 à 10h

Devant un jury composé de :

Sylvie Bourquin	Directrice de Recherche (Géosciences Rennes)	Rapporteur
Sylvian Fachard	Professeur (Université de Lausanne)	Rapporteur
Yannis Lolos	Professeur (Université de Thessalie)	Examineur
Romain Rubi	Docteur (GeoLink)	Examineur
Christian Gorini	Professeur (Sorbonne Université)	Président du jury
Isabelle Moretti	Chercheur (Sorbonne Université – UPPA)	Directrice
Laurent Jolivet	Professeur (Sorbonne Université)	Directeur
Amélie Perrier	Maître de conférence (Université d'Orléans)	Encadrante
Sébastien Rohais	Docteur (IFPEN)	Invité



Remerciements

Premièrement, il me tient de remercier l'École Française d'Athènes pour m'avoir octroyé son contrat doctoral et l'Institut des Sciences de la Terre de Paris, à Sorbonne Université, pour m'avoir accueillie et permis de réaliser cette thèse.

L'accueil de l'EFA, des services administratifs, techniques et de ces membres scientifiques, a été idéal. De même à Paris, mais aussi à Cergy Pontoise et à l'ENSG de Nancy : ce travail n'aurait pas été possible sans la participation de nombreux chercheurs que je remercie chaleureusement, en particulier Christian David.

L'histoire commence en 2018, par un mail à destination d'Orléans mais dont la réponse revint miraculeusement de Delphes : merci à Amélie Perrier pour cette opportunité. Je remercie Laurent Jolivet, pour son aide et ses relectures, et j'espère que l'on se croiera de nouveau au détour d'une île grecque. Enfin, c'est à Isabelle Moretti que je réserve ces derniers mots : pour son accompagnement tout au long de la thèse, sa maîtrise du 4x4 sur le terrain, nos discussions dans des tavernes grecques sur la plage, ses relectures, et son calme olympien toujours rassurant.

A tous les amateurs de la Grèce antique, croisés à Athènes, Delphes ou ailleurs, dans les maisons de fouilles ou les couloirs de la bibliothèque de l'EFA. Si j'ai trouvé la Grèce si accueillante, c'est aussi grâce à toutes ces personnes enthousiastes et passionnées – archéologues, géologues, historiens, architectes, céramologues, épigraphistes, topographes, et j'en oublie – qui ont bien voulu parler « cailloux » avec moi, ou juste profiter de la vie à la grecque.

J'ai été heureuse de côtoyer mes collègues et amis du labo, notamment mes co-bureaux Lauriane, Sepideh, Paul, Tiphaine, Bastien, Camille. Je ne peux citer tous les noms, de tous les couloirs et les étages de l'ISTeP, mais qu'ils ne pensent pas être oubliés.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis, en particulier Aurélie, Romane, Perrine, Omblin, Thomas et Enrique, qui chacun à leur manière m'ont accompagnée tout au long de cette thèse.

Résumé

Cette thèse s'intéresse aux pierres de construction calcaires employées en contexte archéologique dans la construction monumentale du VIIe siècle au Ier siècle avant J.-C. en Grèce continentale, plus précisément sur un ensemble de sites de l'est du Golfe de Corinthe. Contrairement aux marbres, les pierres calcaires et les carrières associées ont rarement fait l'objet d'une étude archéométrique et systématique, et des confusions sur la nature géologique des roches sont même courantes. Les principales questions abordées ici sont donc : (1) quels types de pierre sont mises en œuvre ? (2) D'où proviennent ces pierres employées ? (3) Pourquoi ces pierres ont-elles été choisies ? Cette thèse se base sur un travail de terrain extensif qui a permis de réaliser un inventaire des roches mises en œuvre et des carrières antiques. Il est combiné à l'étude des contextes géologiques et un travail historiographique important, nécessaires puisque le travail sur site archéologique est limité (travail sur des vestiges, sans échantillonnage). Le Golfe de Corinthe est un graben actif quaternaire : sur la marge sud affleurent des dépôts syn-rift, mis à jour suite à la surrection du Péloponnèse. Ces formations ont été exploitées par les constructeurs grecs et ont fournis la majorité des *pôros*, terme générique employé dès l'Antiquité pour désigner des roches récentes peu consolidées de types variés (grès, travertin, tuff, calcaire coquillier). Certains de ces faciès ont été importés, mais la majorité des sites exploite avant tout les ressources locales (calcaires durs, conglomérat ou grès en fonction de la géologie) : on observe une faible diversité de pierres pour chacun des sites (<5 faciès), et plus de 80% du volume de pierre représenté par un unique faciès local. Enfin, pour comprendre les choix de pierres par les constructeurs grecs, une étude des propriétés pétrophysiques de différents matériaux a été réalisée. La masse volumique était visiblement une des seules propriétés importantes. Un site possède des caractéristiques exceptionnelles : le sanctuaire de Delphes, où plus d'une vingtaine de faciès ont été identifiés : les faciès locaux (calcaires, brèches et travertins) représentent un volume finalement assez faible. La moitié sont allochtones et représentent plus de 50% du volume de pierres mis en œuvre : la dune oolithique de Corinthe, le calcaire de Mégare, des calcaires noires, des marbres cycladiques et attiques, mais aussi des grès variés dont l'origine reste à définir. Ces nouvelles données nous informent sur les échanges de pierres à l'échelle du Golfe dans l'Antiquité, et proposent des pistes sur l'étude des pierres calcaires utilisées dans la construction.

Mots clefs : Matériaux de construction, archéologie, Grèce

Abstract

This work focuses on limestone construction-stones used in archaeological context, in monumental construction from the 7th to the 1st century B.C., in continental Greece, more precisely on sites in the eastern Gulf of Corinth. Unlike marbles, limestones and their associated quarries have rarely been the subject of archaeometric and systematic study, and confusions about the geological nature of the rocks are common. The main questions addressed here are therefore: (1) what types of stone were used? (2) where do these stones come from? (3) why were these stones chosen? This thesis is based on extensive fieldworks, which provide an inventory of construction-stones and ancient quarries. It is combined with the study of geological contexts and an important historiographical study, as work on archaeological site is limited (working on remains, without sampling). The Gulf of Corinth is an active quaternary graben: on the southern margin, syn-rift deposits are outcropping because of the uplift of the Peloponnese. These formations were exploited by Greek builders and provided the majority of the *pôros*, a generic term used since Antiquity to speak about recent unconsolidated rocks of various types (sandstone, travertine, tuff, shell limestone). Some of these facies were imported, but the majority of the sites exploited local resources (hard limestone, conglomerate or sandstone, depending on the geology): a low diversity of stones is observed in each site (<5 facies), and more than 80% of the volume of stone is represented by one single local facies. Finally, to understand the choice of stones by the Greek builders, a study of the petrophysical properties of different materials was carried out. Density seemed the only important physical property orienting the builders. One site shows exceptional characteristics: the sanctuary of Delphi, where more than twenty facies have been identified: the local facies (limestone, breccia and travertine) represent a relatively small volume. Half of the facies are allochthonous and represent more than 50% of the volume of stone used: the oolitic dune of Corinth, the limestone of Megara, black limestones, Cycladic and Attic marbles, but also various sandstones whose origin remains to be defined. These new data inform us about the exchange of stones at the scale of the Gulf in Antiquity, and suggest areas for future research on the study of limestone used in construction.

Keywords: Building materials, archaeology, Greece

Sommaire

REMERCIEMENTS	- 2 -
RESUME	- 3 -
ABSTRACT	- 4 -
SOMMAIRE	- 6 -
1 INTRODUCTION	- 10 -
1.1 Naissance du sujet	- 10 -
1.1.1 Contexte et travaux antérieurs	- 10 -
1.1.2 Délimitations temporelles et géographiques de l'étude	- 14 -
1.1.3 Délimitations matérielles	- 17 -
1.2 Contexte géologique	- 19 -
1.2.1 La mer Égée dans l'est méditerranéen	- 19 -
1.2.2 Le Golfe de Corinthe	- 23 -
1.2.3 La région de Delphes	- 27 -
1.3 État de l'art	- 29 -
1.3.1 La pierre calcaire mise en œuvre	- 30 -
1.3.2 Les carrières de pierre calcaire	- 32 -
1.3.3 L'analyse des pierres calcaires	- 35 -
1.4 Synthèse	- 37 -
1.4.1 Acquis et zones d'ombres	- 37 -
1.4.2 La question centrale : la définition des « <i>pôros</i> »	- 37 -
1.4.3 Problématiques de la thèse.....	- 38 -
2 METHODOLOGIE	- 40 -
2.1 Introduction	- 40 -
2.2 Classification des roches mises en œuvre	- 41 -
2.2.1 Description macroscopique sur site	- 41 -
2.2.2 Identification des carrières antiques	- 44 -
2.3 Approches statistiques	- 47 -
2.3.1 Comparaison à l'échelle du Golfe de Corinthe.....	- 47 -

2.3.2	Prise en compte de l'environnement et de l'histoire des sites	- 47 -
2.4	Analyses pétrographiques et minéralogiques en laboratoire	- 48 -
2.4.1	Description macroscopique.....	- 48 -
2.4.2	Microscopie optique	- 49 -
2.4.3	Diffraction aux Rayons X (DRX).....	- 50 -
2.5	Caractérisation physique des pierres	- 51 -
2.5.1	Porosimétrie par saturation à l'eau	- 51 -
2.5.2	Mesures de densité.....	- 53 -
2.5.3	Porosimétrie par intrusion au mercure.....	- 55 -
2.5.4	Imbibition capillaire.....	- 56 -
2.6	Analyses mécaniques	- 57 -
2.6.1	Mesures acoustiques	- 58 -
2.6.2	Résistance à la propagation d'une fissure : essai SCB	- 59 -
2.6.3	Résistance à l'extension : essai brésilien	- 60 -
2.6.4	Résistance à la compression : essai UCS.....	- 61 -
2.7	Synthèse	- 62 -
3	LA PIERRE DANS LA CONSTRUCTION	- 63 -
3.1	Introduction	- 63 -
3.2	La région du Golfe de Lechaion (article)	- 64 -
3.3	Utilisation des pierres dans un sanctuaire panhellénique : Delphes (article)	- 89 -
3.4	Le nord-est du Golfe : la Mégaride et la Béotie	- 106 -
3.4.1	Contexte historique et topographique	- 106 -
3.4.2	Description des roches mises en œuvre	- 108 -
3.5	Le sud et l'ouest du Golfe	- 137 -
3.5.1	Contexte topographique	- 137 -
3.5.2	Description des roches mises en œuvre	- 138 -
3.6	Synthèse	- 169 -
4	LES CARRIERES DE PIERRES CALCAIRES	- 171 -
4.1	Introduction	- 171 -
4.2	Description des carrières antiques	- 173 -
4.3	Approches pétrophysiques	- 200 -
4.3.1	Choix des échantillons et problématiques	- 200 -
4.3.2	Limitations du protocole expérimental	- 202 -

4.3.3	Résultats de laboratoire.....	205 -
4.4	Synthèse	227 -
5	LA PIERRE A DELPHES.....	- 231 -
5.1	Introduction	233 -
5.1.1	Buts et organisation du chapitre.....	233 -
5.1.2	La classification des roches	235 -
5.1.3	Les études antérieures sur la pierre à Delphes	239 -
5.2	Les matériaux locaux de Delphes.....	242 -
5.2.1	Les calcaires du Parnasse.....	242 -
5.2.2	Le calcaire à rudistes.....	246 -
5.2.3	Les calcaires lités	249 -
5.2.4	La brèche de pente	253 -
5.2.5	Le flysch jaune	256 -
5.3	Les matériaux régionaux à Delphes	258 -
5.3.1	Le travertin de la vallée du Pléïstos	258 -
5.3.2	Le calcaire de Saint-Élie	259 -
5.3.3	Le marbre noir de Livadia	263 -
5.4	Les matériaux allochtones	263 -
5.4.1	Les marbres blancs des îles et de l'Attique.....	263 -
5.4.2	La dune oolithique de Corinthe	264 -
5.4.3	Le calcaire coquillier de Mégare	267 -
5.4.4	Les pierres calcaires noires	269 -
5.5	Les matériaux d'origine inconnue	273 -
5.6	Synthèse : les matériaux dans les monuments	278 -
5.6.1	Volumes de roche mis en œuvre.....	278 -
5.6.2	Évolution de l'utilisation des pierres dans le temps et l'espace	281 -
6	INTERPRETATION ET DISCUSSION	- 288 -
6.1	La classification des roches	288 -
6.2	Les matériaux de construction.....	290 -
6.2.1	Une exploitation diversifiée des pierres calcaires.....	290 -
6.2.2	Nouvelle approche sur l'identification des pierres et des carrières	293 -
6.2.3	Le cas de Delphes : une exception à l'échelle du Golfe	295 -
6.3	Les échanges de pierres	297 -
6.3.1	Les limites d'exportation des pierres	297 -
6.3.2	La provenance : locale ou régionale ?	300 -

6.4	Le choix des roches	- 302 -
6.4.1	Comparaison des propriétés physiques et de l'utilisation.....	- 302 -
6.4.2	Nouveau protocole d'analyse des pierres	- 304 -
7	CONCLUSIONS	- 307 -
7.1	Synthèse	- 307 -
7.2	Perspectives	- 309 -
	BIBLIOGRAPHIE	- 311 -
	LISTE DES FIGURES	- 337 -
	ANNEXE A : DOCUMENTATION ARCHEOLOGIQUE	- 342 -
	ANNEXE B : SITES ET CARRIERES	- 343 -
	ANNEXE C : PLANS DE DELPHES	- 346 -
	ANNEXE D : VARIETE, UTILISATION ET VOLUME DES PIERRES A DELPHES	- 349 -
	ANNEXE E : GLOSSAIRE GEOLOGIQUE	- 354 -

1 Introduction

Sommaire

1.1 Naissance du sujet

1.1.1 Contexte scientifique et travaux antérieurs

1.1.2 Délimitations temporelles et géographiques

1.1.3 Délimitations matérielles

1.2 Contexte géologique

1.2.1 La mer Égée dans l'est méditerranéen

1.2.1 Le Golfe de Corinthe

1.2.3. La région de Delphes

1.3 État de l'art

1.3.1 La pierre calcaire mise en œuvre

1.3.2 Les carrières de pierres calcaires

1.3.3 L'analyse des pierres calcaires

1.4 Synthèse

1.4.1 Acquis et zones d'ombre

1.4.2 La question centrale : la définition des « pôros »

1.4.3 Problématiques de la thèse

1.1 Naissance du sujet

1.1.1 Contexte et travaux antérieurs

En 2017, un programme de recherche pluriannuel débute à l'École Française d'Athènes (EFA) : « La pierre à Délos et à Delphes : architecture et sculpture du VIIe au Ier s. av. J.-C », sous la responsabilité de Jean-Charles Moretti (Délos) et Amélie Perrier (Delphes). Ce projet a pour but d'étudier les différentes étapes de la mise en œuvre de la pierre dans l'architecture et dans la sculpture, de la carrière au monument. Géologues, archéologues, architectes et historiens collaborent dans une approche interdisciplinaire, sur deux sites archéologiques connus pour leur richesse et inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO : le sanctuaire panhellénique de Delphes, et l'île sacrée de Délos.

La pierre, contrairement à d'autres matériaux, n'est pas périssable et compose la majorité des vestiges archéologiques antiques qui nous sont parvenus : outils, sculptures, monuments. L'origine des pierres est donc une question d'importance pour la recherche archéologique : elle représente un indice supplémentaire pour comprendre les sociétés antiques et leur fonctionnement. C'est aussi un matériau particulièrement intéressant car la pierre est une ressource accessible pratiquement partout : pourtant, elle a été importée, dans des volumes parfois conséquents pour la construction. L'importation et l'exportation de roche sont donc des choix, qui répondent à des contraintes : des raisons pratiques, techniques, économiques ou politiques. Retracer les échanges de pierres apporte des informations sur l'origine du monument, du dédicant ou des constructeurs, et reflète les moyens mis en œuvre par ces derniers (financiers, humains). L'étude des échanges de pierres peut aussi nous renseigner sur les relations entre la région ayant produit la pierre et celle où elle est employée, et sur les connaissances techniques de l'époque en fonction du matériau choisi.

En Grèce, la question de l'origine et de la nature des roches utilisées dans la construction s'est posée dès les premières recherches archéologiques. Il est aujourd'hui acquis que les pierres étaient importées : en particulier les marbres aux époques archaïque et classique, accompagnés par les pierres colorées (rouge, verte, bleue) recherchées à partir de la période hellénistique (Martin 1965; Orlandos 1968). Si la précision concernant l'origine des pierres n'a fait qu'augmenter avec l'amélioration des techniques d'analyses invasives et non-invasives, les études se sont surtout concentrées sur les marbres jusqu'à aujourd'hui. Les marbres sont des roches métamorphiques : des calcaires recristallisés suite à une augmentation de pression et de température. Composés majoritairement de calcite ou de dolomie, ils présentent une très faible porosité et peuvent être polis. De ce fait, ils ont été utilisés en sculpture et ont polarisé les études sur la pierre. S'ils représentent la majorité des roches carbonatées des Cyclades, ils sont plus rares dans la région de Corinthe, où prédominent des calcaires peu ou pas métamorphiques ainsi que d'autres roches sédimentaires.

Celles-ci sont issues de l'accumulation de sédiments et peuvent être très variées, généralement classées selon leur processus de formation : roches détritiques (accumulation de fragments de roches préexistantes : grès, conglomérats), roches biogéniques (accumulation d'éléments produits par des organismes, comme les coquilles : craie), roches biogènes ou chimiques (produites par ou grâce à l'activité biologique ou des processus physico-chimiques : travertin). Un calcaire désigne une roche composée à plus de 50% de calcite : il peut correspondre à tous les processus de formation cités au-dessus.

L'étude des calcaires utilisés dans la construction grecque antique reste assez peu développée et les études à large échelle sont encore rares (voir l'état de l'art, [1.3](#)) : l'exploitation et l'utilisation des pierres calcaires sont donc encore mal comprises aujourd'hui.

C'est dans ce cadre que le projet de l'EFA a vu le jour, et que j'ai commencé à étudier la pierre calcaire en contexte archéologique. A Délos, l'ANR Géologie et Archéologie à Délos (GAD), coordonnée par Jean-Charles Moretti, a débuté en 2018, avec entre autres un sujet de thèse sur la provenance des marbres (T. Vettor, sous la direction de V. Sautter, MNHN). A Delphes, un premier stage de master, réalisé par R. Gastineau à l'Université de Rennes sous la direction de R. Rubi et S. Bourquin, a permis de produire une carte géologique de la région et une liste des matériaux employés (Gastineau 2017). J'ai ensuite repris l'étude géologique pour mes travaux de master sur la pierre de construction employée à Delphes, sous la direction d'Amélie Perrier (EFA), à l'Université Claude Bernard de Lyon (de Vals 2018, 2019). Le sujet de cette thèse s'inscrit dans la prolongation de ces stages.

Avant le début de ce travail, nous avons montré que la construction delphique présentait une forte diversité de pierres d'origine non-locale (de Vals *et al.* 2020). En particulier, des pierres calcaires de Corinthe étaient importées dès la période archaïque et pendant la période classique, comme l'attestent les comptes de construction du Temple du IV^e siècle (Bourguet 1932; Bousquet 1942; Roux 1966). Ces pierres étaient généralement stuquées, recouvertes de plâtre ou d'un enduit, et peintes lorsqu'elles étaient employées dans l'élévation. Elles furent utilisées pour l'intégralité de certains monuments, des fondations à l'entablement - partie au-dessus des colonnes, qui se compose de l'architrave, la frise et la corniche, et qui supporte le toit - pour les trésors archaïques (Laroche & Nenna 1993) (en **Annexe A1**, un schéma des ordres dorique et ionique est présenté, les ordres architecturaux les plus communs dans l'architecture grecque, avec le vocabulaire associé). Cependant, des zones d'ombre demeuraient sur l'intérêt d'importer ces calcaires, et sur leur provenance.

Pour la thèse, nous avons décidé d'élargir la zone d'étude, pour prendre en compte Delphes, mais aussi un ensemble de sites archéologiques sur les marges du Golfe de Corinthe. Cet espace fermé, où des échanges de pierres sont déjà attestés, apparaît comme un laboratoire idéal pour travailler sur les calcaires utilisés dans la construction. Les travaux présentés ici sont donc majoritairement exploratoires, dans le but d'établir les grandes lignes de l'utilisation des pierres calcaires (origine, nature) et les critères de choix de ces dernières (esthétique, économique, technique) dans la construction. Notre approche se base sur l'inventaire et la

description des pierres mises en œuvre, l'étude des carrières antiques et des roches extraites, et sur une comparaison entre les différents sites. En particulier, c'est en identifiant des motifs récurrents dans l'utilisation des pierres, que nous pouvons comprendre les raisons qui guidaient les choix des constructeurs grecs. Enfin, ce travail permettra de proposer de nouvelles pistes de recherche sur les pierres calcaires, fondées sur de nouveaux arguments lithologiques.

A cheval entre deux disciplines – la géologie et l'archéologie –, ce projet très large et riche m'a permis de collaborer avec différentes institutions, de travailler en France et en Grèce, sur le terrain, en laboratoire et en bibliothèque.

C'est à l'EFA qu'une grande partie du travail a été réalisée. L'École possède une des plus riches bibliothèques en archéologie grecque, un fond d'archives et surtout un siège athénien qui permet d'accueillir chercheurs et étudiants, ainsi que plusieurs maisons de fouilles, dont une à Delphes. J'ai ainsi pu passer plusieurs mois en Grèce, à Athènes et à Delphes, pour travailler avec les ressources disponibles. Les membres de l'École, le personnel scientifique et administratif, et les chercheurs associés, ont été d'une grande aide et ont partagé leurs connaissances sur la Grèce antique. Les missions à Delphes se sont faites en compagnie d'autres équipes de recherche, qui ont été très intéressées par nos travaux : Guy Ackermann, qui travaille sur le gymnase, et l'équipe de Marmaria avec Sandrine Huber, Anne Jacquemin, et Didier Laroche, architecte, qui a aussi été d'une grande aide dans les parkings à bloc du sanctuaire. Le terrain a été réalisé en grande partie à Delphes avec Luigi Piccardi, géologue, du CNR (Florence). Enfin, la mission en Béotie en octobre 2020 a été réalisée avec et grâce à Thierry Lucas, archéologue et membre de l'EFA, qui a pu nous faire profiter de ses connaissances sur la région. Le soutien de l'EFA s'est illustré par l'attribution d'un contrat doctoral à ce sujet de thèse, pour une durée de trois ans à partir d'octobre 2019.

La thèse s'est déroulée à Sorbonne-Université, Paris, au laboratoire de géologie de l'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP), sous la direction et d'Isabelle Moretti et de Laurent Jolivet, géologues et respectivement chercheuse associée et professeur à Sorbonne Université, et l'encadrement d'Amélie Perrier, archéologue et maître de Conférences à l'Université d'Orléans. Les missions de terrain en Grèce, à Delphes, à Athènes et en itinérance autour du Golfe de Corinthe, réalisées avec I. Moretti, ont été possibles grâce au concours de l'EFA et de l'ISTeP. Enfin, les travaux de laboratoire ont été réalisés à Sorbonne Université, mais aussi à l'Université de Cergy-Pontoise grâce à la collaboration de Christian David, professeur au Laboratoire Géosciences & Environnement. Des analyses ont aussi été réalisées

à Nancy, à l'École Normale Supérieure de Géologie (ENSG), par Yves Géraud, professeur à l'Université de Lorraine.

1.1.2 Délimitations temporelles et géographiques de l'étude

Pour bien comprendre l'organisation de la thèse, il faut premièrement expliciter les limites du sujet, qu'elles soient temporelles ou géographiques. Il fallait en effet choisir une période et une zone d'étude homogène, pour que les motifs observés dans l'emploi des calcaires dépendent majoritairement de la nature des roches, et soient significatives d'un point de vue historique.

La période étudiée s'étend du VIIe au Ier siècle avant JC, ce qui correspond à une partie de la Grèce antique : les périodes archaïque, classique et hellénistique (**Figure 1**). Ces limites ont été définies sur plusieurs critères historiques et technologiques.

Le sujet commence à l'époque archaïque car cette dernière est marquée, entre autres, par le retour de la construction en pierre. En effet, la chute de la civilisation mycénienne au XIIe siècle avant JC fut accompagnée d'un dépeuplement général de la Grèce, une perte de l'écriture et des techniques de construction monumentale. La période qui suit, appelée parfois « les siècles obscurs » (XIe - IXe siècles avant JC), marque une transition vers une Grèce antique organisée autour des cités-états, mais peu de vestiges archéologiques nous sont parvenus. Il faut attendre le VIIIe siècle avant JC pour voir apparaître les premières cités, les débuts de l'expansion coloniale, la monnaie, et se développer de nouveau la construction monumentale (Lefèvre 2007).

L'étude s'arrête au Ier siècle avant JC : le début de la domination romaine. Dans la construction, cette période se traduit par des matériaux différents, avec un emploi généralisé de la brique et du mortier, du remploi, et de pierres plus variées et d'origine plus lointaine (Italie, Égypte, Turquie) (Ginouvs *et al.* 1985). On peut noter que l'influence de Rome s'observe en Grèce depuis le IIIe siècle avant JC : alliances avec des cités grecques de l'Adriatique, protectorat en Macédoine au début du IIe siècle. En 146 avant JC la bataille de Corinthe se finit par une victoire romaine et la destruction de la cité : le Péloponnèse devient ensuite aussi un protectorat romain. Enfin, la mort de Cléopâtre en 30 avant JC marque officiellement la fin de l'époque hellénistique et le début de celle romaine.

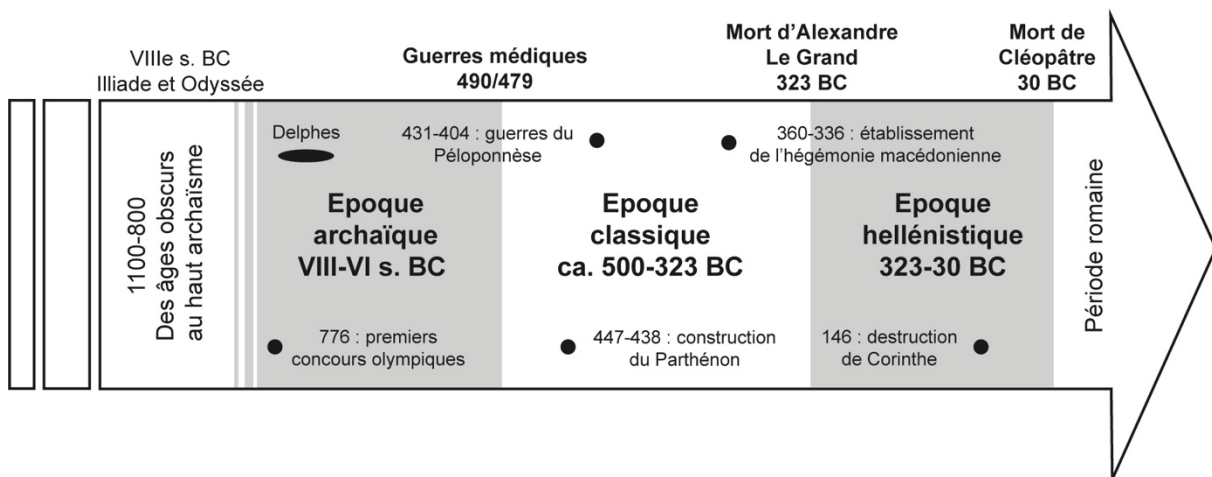


Figure 1. Frise chronologique simplifiée de la Grèce antique (d'après Lefèvre, 2007).

Cet intervalle chronologique a aussi été choisi car il présente des techniques d'exploitation et d'extraction de la pierre stables sur toute la période étudiée (Kozelj 1988a; Fant 2009). Celles-ci ont été perfectionnées à la fin du VIII^e siècle avant JC avec l'utilisation de la pioche et des coins pour l'extraction, ciseaux et marteaux pour la découpe et la taille des blocs (**Figure 2**). Cette stabilité technologique nous permet d'exclure à première vue, parmi les critères de choix des pierres, ceux liés aux connaissances techniques, plutôt qu'au type de roche. Cependant, des diversités régionales peuvent exister et doivent être prises en compte. L'utilisation de ces techniques va perdurer à l'époque romaine et médiévale sans innovation substantielle : il faut attendre l'époque moderne puis la mécanisation au XVIII^e siècle pour révolutionner l'extraction de la pierre traditionnelle.

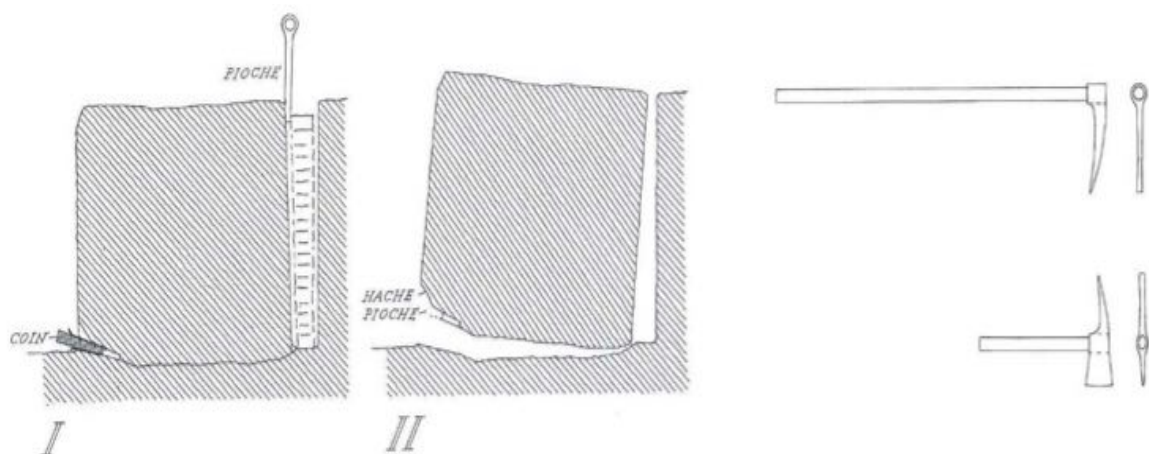


Figure 2. Principe d'extraction d'un bloc (Amandry & Hansen 2010).

I : taille du fossé par derrière et sillon par devant, en bas (après préparation à la hache).
 Enfoncement de coins. II : Le bloc détaché par fendage. A droite, essai de restitution des outils de carrier.

Les besoins en pierre de construction n'évoluent pas ou peu avant la période romaine : dans la Grèce antique, de gros blocs étaient utilisés pour la construction monumentale, alors que la taille recherchée était plus petite aux époques romaines et byzantines (Kozelj 1988a). Cela a dû influencer le choix des roches dès l'implantation d'une carrière.

L'étude se limite géographiquement au Golfe de Corinthe, mais les sites étudiés s'étendent de Kalydon à l'ouest à Kalaurie à l'est, Argos au sud et Akraiphia au nord (**Figure 3**). La multiplication des sites étudiés était nécessaire pour une approche statistique, mais un intérêt particulier est porté sur la région est du Golfe, autour de Corinthe, un espace relativement homogène et fermé où des échanges de pierres sont déjà attestés.

En effet, la marge nord du Golfe est marquée par les reliefs accentués de la chaîne des Hellénides, avec la chaîne du Parnasse, au pied duquel se trouve Delphes, le Mont Hélicon jusqu'au Mont Cithéron, l'extrémité ouest du Massif du Parnès. La marge sud du golfe est plus ouverte, mais au sud des terrasses de Xylokastro, le relief s'accroît rapidement pour atteindre 2 370 mètres avec le Mont Cyllène. Le territoire est délimité à l'est par l'isthme de Corinthe, qui relie le Péloponnèse à la Grèce continentale, mais qui représente aussi une ouverture sur la Mer Égée. À l'ouest, le détroit de Rion-Antirion marque la limite du Golfe et son ouverture sur la mer Ionienne.

Finalement, ce territoire ne serait pas idéal pour l'étude de l'exportation de la pierre sans la présence de la mer, qui fait du Golfe de Corinthe un lieu d'échange. En effet, les transports de marchandises, comme les matériaux de construction, se font principalement par mer dans l'Antiquité comme aujourd'hui (Burford 1960; Wurch-Kozelj 1988; Hansen 2000). Enfin, la région entre Corinthe et Sicyone était connue pour être un grand centre de production de pierre de construction et des échanges sont déjà attestés (Brookes 1981; Rhodes 1987; Hayward 1996).



Figure 3. Carte topographique de la zone étudiée montrant les sites archéologiques et les principaux toponymes (villes, régions, montagnes) mentionnés dans la thèse.

1.1.3 Délimitations matérielles

Le sujet se concentre sur la pierre de taille, employée dans la construction monumentale publique (murs, murailles, infrastructures publiques comme les fontaines, halls) et religieuse (temples, autels, offrandes). En effet, si la pierre est de nouveau employée au VII^e siècle avant JC, c'est de manière exceptionnelle et limitée en premier lieu aux projets monumentaux : dans les sanctuaires, les palais et tombes monumentales, les bâtiments publics civiques et d'infrastructure, et en sculpture. En Grèce continentale, les bâtiments ordinaires, comme les habitations, étaient construits en brique crue ou en bois, généralement montés sur des fondations en pierres ou en gravats (Wycherley 1962).

De fait, ce sont aussi ces monuments en pierre qui ont survécu et ont été conservés jusqu'aujourd'hui. Dans la région du Golfe de Corinthe, les constructions sont variées avec des sanctuaires panhelléniques (Delphes, Isthmia, Némée), des sanctuaires (Héraion de Perachora, Héraion d'Argos), des Cités-États (Corinthe, Sicyone, Argos, Thèbes), des cités plus modestes (Phénéos, Stymphale), ou des villes fortifiées (Aigosthènes, Éleuthères) (**Figure 3**). Il faut donc

garder en tête les biais liés au contexte historique et économique de chaque site et à la nature des monuments étudiés. Une construction en pierre de taille financée par l'élite de la société, dans un but religieux, mettra en œuvre des moyens naturellement supérieurs à la construction de murs de défense ou de tours de garde.

Enfin, nous étudions des vestiges archéologiques : les restes de constructions, dont la grande majorité a disparu, ou ayant été réemployés à des époques postérieures. Il y a donc une différence importante entre ce que nous observons aujourd'hui et ce qui a réellement existé (**Figure 4**). En particulier, il faudra être prudent sur les estimations des volumes et de l'utilisation des faciès dans le bâti, qui sont cependant nécessaires dans les premières étapes d'une étude des matériaux de construction d'un site archéologique.

Si nos vestiges sont variés et par définition fragmentaires, ils sont aussi inestimables : ils doivent être protégés. Il n'est donc pas possible de casser la roche ou de prélever un échantillon, sans les autorisations des autorités responsables des sites. En Grèce, ce sont les Éphories des différentes régions qui sont en charge de la protection et la mise en valeur du patrimoine archéologique. Certains vestiges sont inaccessibles, protégés (clôturés par exemple) ou rangés dans les musées : les études sur site sont donc très limitées, et cela doit être pris en compte dans la méthodologie choisie, nos observations, et l'interprétation des résultats. Delphes est le seul site où nous avons les autorisations nécessaires pour réaliser une étude plus poussée.



Figure 4. Les vestiges étudiés : quelques exemples dans le Golfe de Corinthe.
 De gauche à droite et de bas en haut : le Temple d'Apollon à Corinthe, construit en dune oolithique ; la Palestre (gymnase) à Sicyone, entièrement en conglomérat ; le Temple d'Apollon à Delphes, colonne en dune oolithique et plateforme en calcaire dur ; le Temple de Zeus à Némée, construit entièrement en travertin.

1.2 Contexte géologique

1.2.1 La mer Égée dans l'est méditerranéen

Le contexte géodynamique de l'est méditerranéen est caractérisé par la convergence des plaques Afrique et Eurasie depuis le Mésozoïque. Elle se traduit par différents phénomènes allant de la collision continentale (formation des Alpes, des Dinarides, des Hellénides au

Cénozoïque) à la subduction océanique, avec la mise en place de l'arc hellénique à la fin du Crétacé (Dercourt *et al.* 1986).

Dans ce contexte, la ceinture orogénique des Hellénides s'est formée par chevauchement de nappes et est divisée entre les Hellénides externes et internes, séparées par un chevauchement majeur. On nomme ces unités, avec quelques variations selon les auteurs, d'ouest en est : zone pré-Apulienne, Ionienne, Phyllite-Quartzite, Gavrovo-Tripolitza, du Pinde et du Parnasse ; puis pour les Hellénides internes, les zones pélagonienne, du Vardar et Serbo-Macédonienne avec le massif du Rhodope (Aubouin 1959; Fleury 1980; Papanikolaou 1993, 2013; Robertson *et al.* 1996; Doutsos *et al.* 2006; Jolivet & Brun 2010) (**Figure 5**).

Ces différentes zones représentent d'anciens domaines paléogéographiques de la Téthys : microcontinents, océans profonds, plateformes carbonatées, bassins, et présentent donc des lithologies très variées. Les différentes nappes des Hellénides externes montrent une stratigraphie similaire, avec des dépôts carbonatés mésozoïques recouverts par des formations cénozoïques détritiques (flysch, turbidites ou marnes), alors que les Hellénides internes sont plus complexes. Nous décrirons rapidement les nappes présentes dans notre zone d'étude (**Figure 5**) :

- La **nappe ionienne** se caractérise par un remplissage de bassin du Trias au Miocène, avec des dépôts évaporitiques triasiques, une unité de calcaires néritiques à pélagiques du Jurassique-Crétacé, et des flyschs à partir de l'Oligocène (Aubouin 1959).
- La **nappe de Gavrovo-Tripolitza** se compose de dépôts carbonatés du Jurassique à l'Éocène supérieur et d'un flysch paléocène (Fleury 1980).
- La **nappe du Pinde** correspond à un bassin profond avec une succession sédimentaire du Trias à l'Éocène, pouvant atteindre 2000 mètres d'épaisseur, composée de calcaires hémipélagiques, de carbonates de plateforme au Crétacé, et de flyschs paléocènes qui marquent la fermeture de bassin du Pinde (Fleury 1980; Pe-Piper & Piper 1984; Piper 2006).
- La **zone du Parnasse** correspond à une ancienne plateforme carbonatée et se compose d'une succession de plus d'un kilomètre d'épaisseur de calcaires néritiques datant du Trias au Crétacé supérieur et de calcaires pélagiques du Campanien au Maastrichtien, recouverts par des marnes et des flyschs paléogènes (Celet 1962; Fleury 1980; Mettos *et al.* 2009).
- La **zone pélagonienne**, dans les Hellénides internes, est séparée de la zone du Parnasse par un chevauchement majeur. On la retrouve à l'est du golfe, elle est interprétée comme un micro-continent et présente une structure plus complexe : socle hercynien, formations mésozoïques et nappe ophiolitique.

A partir d'environ 35 Ma, l'extension d'arrière-arc débute dans le domaine égéen (McKenzie 1972; Le Pichon & Angelier 1979; Jolivet *et al.* 1994). Le recul de la subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiennne le long de l'arc hellénique vers le sud entraîne la formation d'un bassin d'arrière-arc : la mer Égée (Fytikas *et al.* 1984; Jolivet & Faccenna 2000; Jolivet 2001).

Entre 35 et 5 Ma, l'extension est accommodée sur l'ensemble du bassin égéen avec, en particulier, les formations des MCCs (*Metamorphic Core Complex*, exhumation de roches métamorphiques et formation des Cyclades) (Lister *et al.* 1984; Jolivet *et al.* 1994; Jolivet & Brun 2010) (**Figure 5**). A cela s'ajoute, entre 15 Ma et 8 Ma, une rotation dans le sens horaire pour les Hellénides, qui prennent leur orientation actuelle, presque NS (Kissel & Laj 1988; Morris & Anderson 1996; Kissel *et al.* 2003; van Hinsbergen *et al.* 2005).

Ainsi, la fin de la convergence Afrique-Eurasie et l'extension égéenne sont synchrones à partir du Miocène : les structures accommodant l'extension d'arrière-arc viennent recouper l'héritage structural des Hellénides et parfois réactiver en extension certains niveaux de décollement dans le Péloponnèse et en Grèce centrale (**Figure 6**). A partir du Pliocène, l'extension est localisée dans des grabens actifs en Grèce et en Turquie, et dans les régions périphériques de la mer Égée (Armijo *et al.* 1996; Dinter 1998; Jolivet 2001; Papanikolaou & Royden 2007; Jolivet & Brun 2010).

Le rift de Corinthe, notre zone d'étude, est une des structures les plus récentes résultant de cette extension égéenne depuis le Miocène. Cependant, l'imbrication des mécanismes contrôlant son évolution est complexe. Son ouverture peut être aussi liée à la prolongation de la Faille Nord Anatolienne (NAF) dans le domaine égéen depuis le Pliocène, qui s'additionne à l'extension d'arrière-arc (Le Pichon & Angelier 1979; Dinter 1998; Armijo *et al.* 1999; Gautier *et al.* 1999; Jolivet 2001; Moretti *et al.* 2003; Jolivet *et al.* 2013).

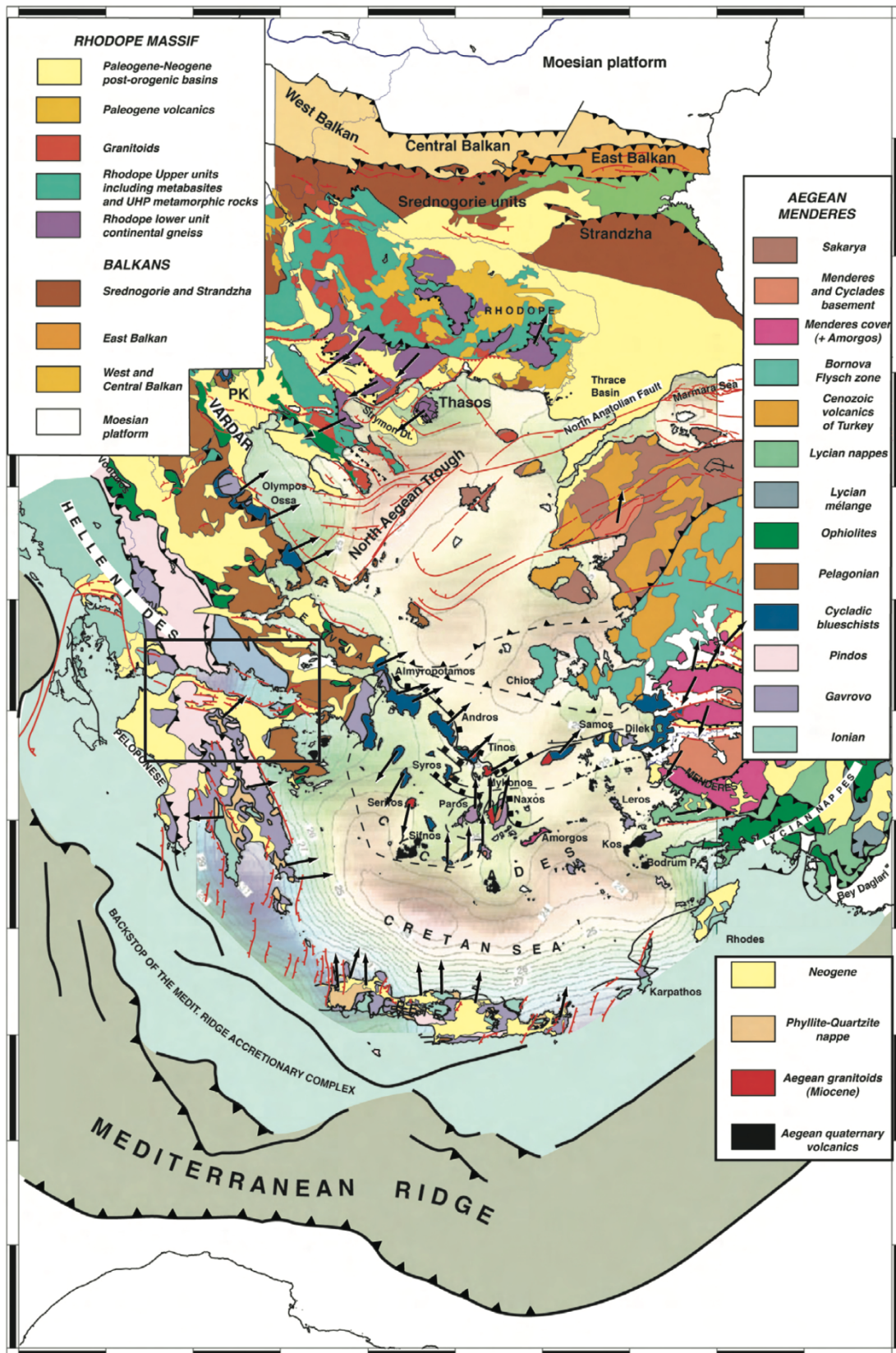


Figure 5. Carte tectonique de la région égéenne, d'après Jolivet et al., 2013.
 L'encadré noir marque la zone d'étude, où affleurent les zones ionienne (vert-bleu clair), Gavrovro (violet), du Pinde (rose), du Parnasse (bleu), et pélagonienne (marron).

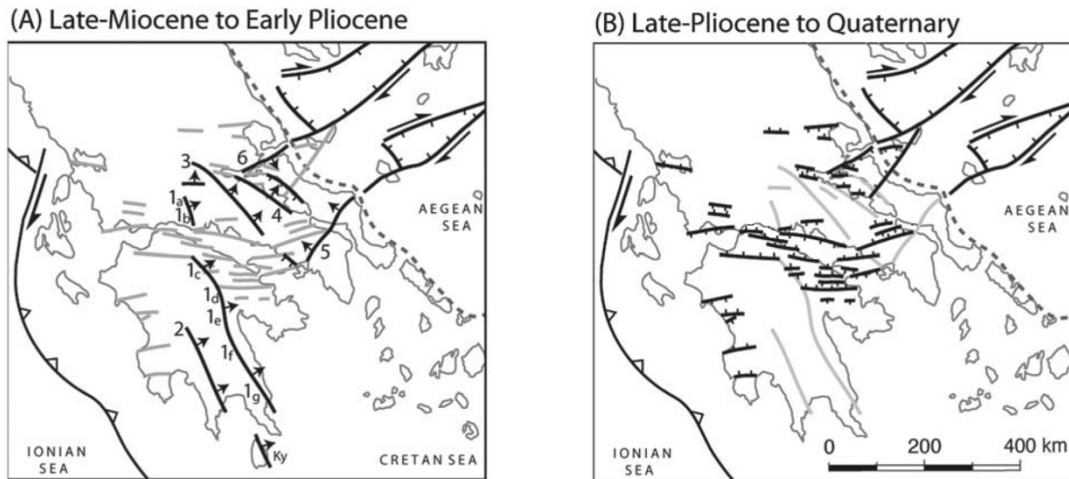


Figure 6. Carte tectonique simplifiée du Péloponnèse et de la Grèce centrale.

Présentation de l'évolution de la répartition des failles normales liées à l'extension à la fin du Miocène (A) jusqu'au Pléistocène (B) (Papanikolaou & Royden, 2007).

(A), 1 : East Peloponnesus Detachment System ; 2 : East Sterea Extensional System ; 3 : Beotikos-Kiffissos Detachment ; 4 : Aghios-Konstantinos Detachment ; 5 : Southern Evia-Northern Attica Detachment; 6 : Maliac Detachment. Les failles actives à une autre période sont en gris.

1.2.2 Le Golfe de Corinthe

Le Golfe de Corinthe sépare le Péloponnèse de la Grèce Continentale, avec à l'est l'Isthme de Corinthe qui le coupe de la mer Égée, et à l'ouest le détroit de Rion-Antirion (**Figure 7**). Long de 105 kilomètres et large d'environ 30 kilomètres, ce golfe est la zone sismique la plus active d'Europe et un des rifts continentaux les plus rapides au monde, avec une ouverture N-S de 1,5 cm/an à l'ouest et 0,5 cm/an à l'est (Briole *et al.* 2000; Bernard *et al.* 2006).

C'est un rift plio-quaternaire bordé par un système de failles normales, orientées E-W, récentes (moins de 2 Ma) et organisées en échelon. Les bordures paraissent asymétriques (Armijo *et al.* 1996) mais le rift est globalement symétrique (Moretti *et al.* 2003). Cependant, le Péloponnèse est en surrection, à une vitesse d'environ 1 mm/an depuis environ 1 Ma (Tselentis & Makropoulos 1986; Collier *et al.* 1992; Davies *et al.* 1997) alors que la marge nord est en subsidence (Lykousis *et al.* 2007). De plus, l'ouest du rift est plus étroit et peu profond, mais s'ouvre et se soulève désormais plus rapidement (Stewart & Vita-Finzi 1996; Briole *et al.* 2000). Le Golfe était initialement connecté à la mer à l'est, et la surrection de la zone Loutraki-Mégare a entraîné sa fermeture il y a 300 000 ans (Rohais & Moretti 2017; Caterina *et al.* 2022).

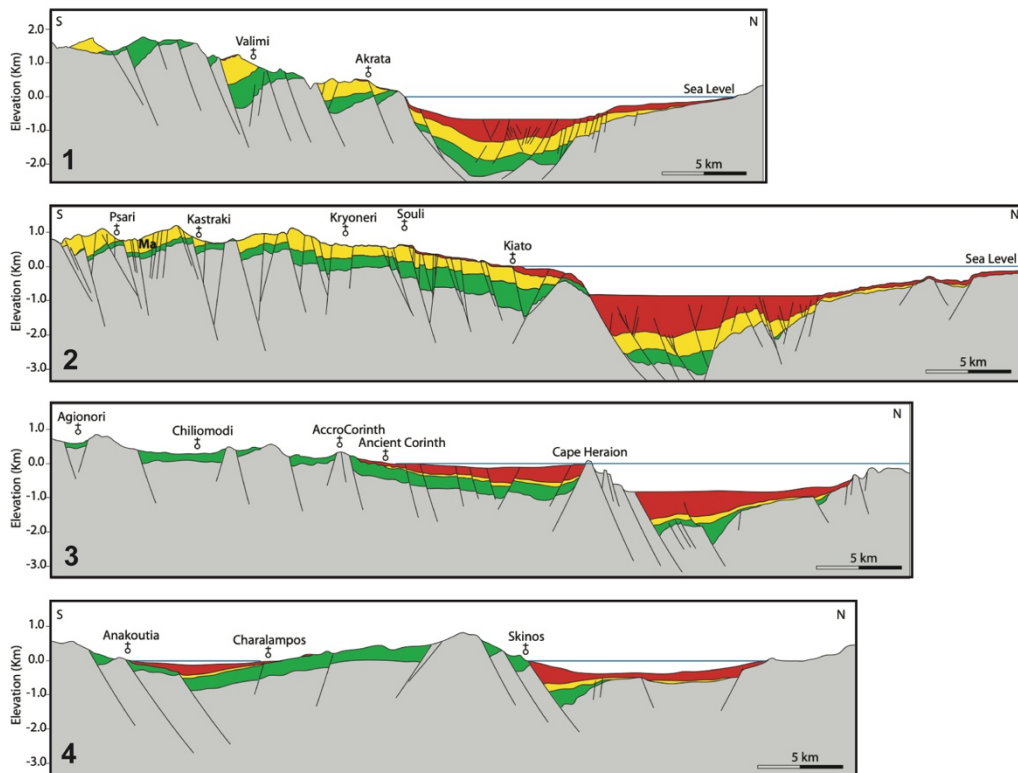
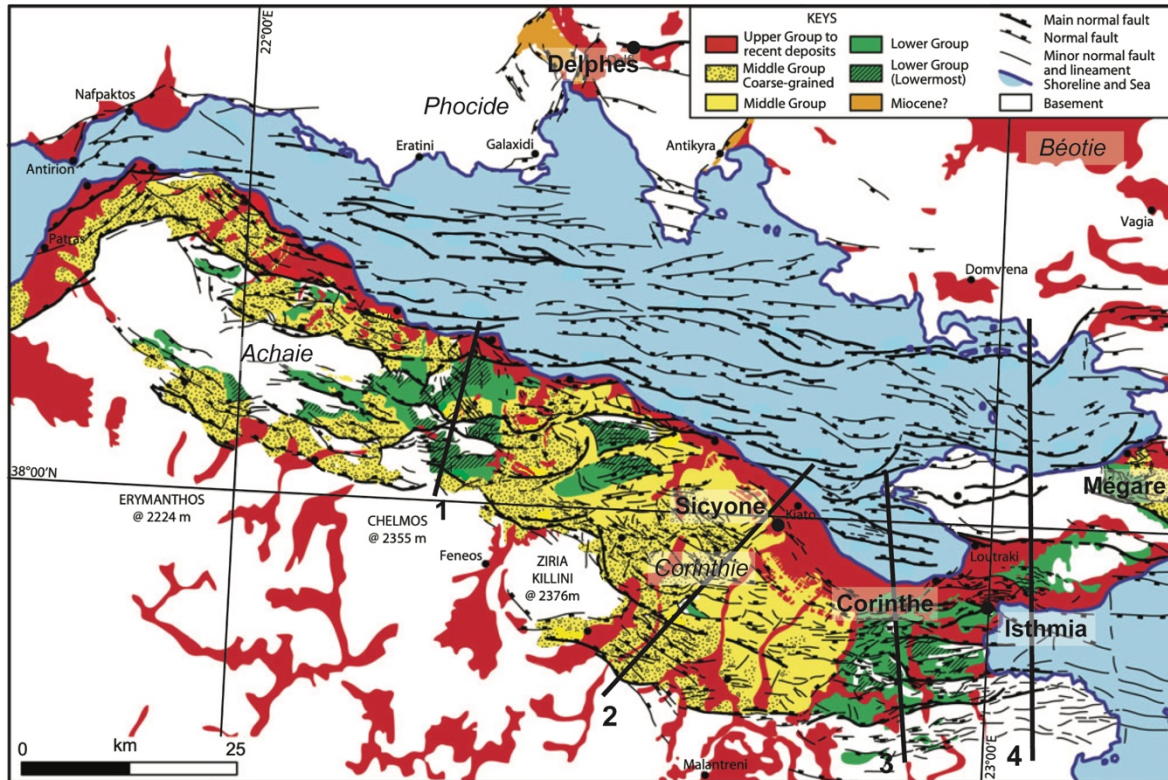


Figure 7. Carte géo-tectonique et coupes du remplissage sédimentaire du Golfe de Corinthe (modifié d'après Rohais et Moretti, 2017).

Montrant la distribution des dépôts syn-rift dans l'est du Golfe : en gris, les formations anté-rift ; en vert, le Lower Group ; en jaune, le Middle Group ; en rouge, l'Upper Group.

La surrection du Péloponnèse a exposé les séries sédimentaires syn-rift sur la marge sud du Golfe, qui peuvent se synthétiser en trois unités (Ori 1989; Taylor *et al.* 2011; Ford *et al.* 2013, 2017; Nixon *et al.* 2016; Rohais & Moretti 2017) :

- Le « **Lower Group** », entre 5 (?) et 3,2 Ma : phase d'initiation du rift avec formation d'un bassin, dominé par des dépôts continentaux à lacustres ;
- Le « **Middle Group** », entre 3,2 et 0,8 Ma : augmentation de l'activité des failles et approfondissement du bassin, avec formation des Gilbert-deltas sur la marge sud pouvant atteindre jusqu'à 1000 mètres d'épaisseur ;
- Le « **Upper Group** », entre 0,8 et 0 Ma : avec la formation de grandes failles normales actives encore aujourd'hui et la surrection du Péloponnèse, les dépôts des *Lower* et *Middle Groups* sont exposés et de nouveaux Gilbert-deltas en mer se forment. Ce soulèvement est marqué par la formation de terrasses marines.

Les formations récentes, qui ont été exploitées pour la construction en pierre, appartiennent à ces unités syn-rift : les terrasses marines de Corinthe et les dépôts côtiers quaternaires de Perachora (**Figure 8**).

A **Corinthe**, 6 terrasses marines datées du Pléistocène, qui se divisent en 8 terrasses au niveau de Sicyone, ont été documentées (Sébrier 1977; Dufaure & Zamanis 1979; Keraudren & Sorel 1987; Armijo *et al.* 1996). Reposant sur les turbidites du *Lower* et/ou du *Middle Group*, elles sont composées de conglomérats, sur lesquels des formations tidales se sont parfois déposées, comme des dunes longitudinales et transverses (Collier 1988, 1990) : elles enregistrent les lignes de rivages successives. Ces terrasses ne s'étendent pas jusqu'à la région d'Isthmia, mais leur extension n'est pas clairement contrainte.

La surrection de la **péninsule de Perachora** et l'activité des failles du *South Alkyonides Fault System* (SAFS) ont exposé des dépôts côtiers caractérisés par des biohermes microbiaux (Dia *et al.* 1997; Kershaw & Guo 2003, 2006; Portman *et al.* 2005; Andrews *et al.* 2007; Robertson *et al.* 2020). Ces stromatolithes reposent sur des dépôts de l'*Upper Group* ou sur le substrat pélagonien et peuvent atteindre 10 mètres d'épaisseur.

Le **bassin de Mégare** est un demi-graben orienté NW-SE de 20 kilomètres de long, sur 10 kilomètres de large, délimité par un système de failles normales au nord (Leeder *et al.* 1991, 2008). Le remplissage du bassin est peu contraint, mais le début de la sédimentation est estimé au Miocène, et au plus tard au début du Pliocène. La succession sédimentaire montre des dépôts

alluviaux, puis une transgression lacustre caractérisée par des dépôts deltaïques, fluviatiles avec formation de paléosols, et des formations conglomératiques récentes (Theodoropoulos 1968; Bentham *et al.* 1991).

La **région béotienne** se situe entre le graben de Corinthe et le bassin d'Eubée, et correspond à une zone d'extension crustale coupée par de longs segments de failles normales, l'ensemble étant orienté globalement E-W, avec des rejets pouvant aller jusqu'à 1000 mètres (Goldsworthy *et al.* 2002). Deux ensembles lithologiques principaux s'observent dans la région (Tsodoulos *et al.* 2008) : les unités mésozoïques pré-rift de la nappe pélagonienne, qui se composent de calcaires et calcaires dolomitiques du Trias moyen au Jurassique inférieur ; et les unités sédimentaires post-orogéniques : dépôts lacustres du Pliocène (marnes, argiles, grès, conglomérats) ; dépôts fluviaux du Pléistocène (conglomérats, grès et sables, avec à sa base une unité massive de brèche carbonatée) ; dépôts alluviaux et éboulis de pente holocènes.

Sur la **marge nord du Golfe** de Corinthe, la sédimentation oligo-miocène syn-rift est manquante et des brèches de pente quaternaires reposent en discordance sur les calcaires mésozoïques et les flyschs (Sébrier 1977).

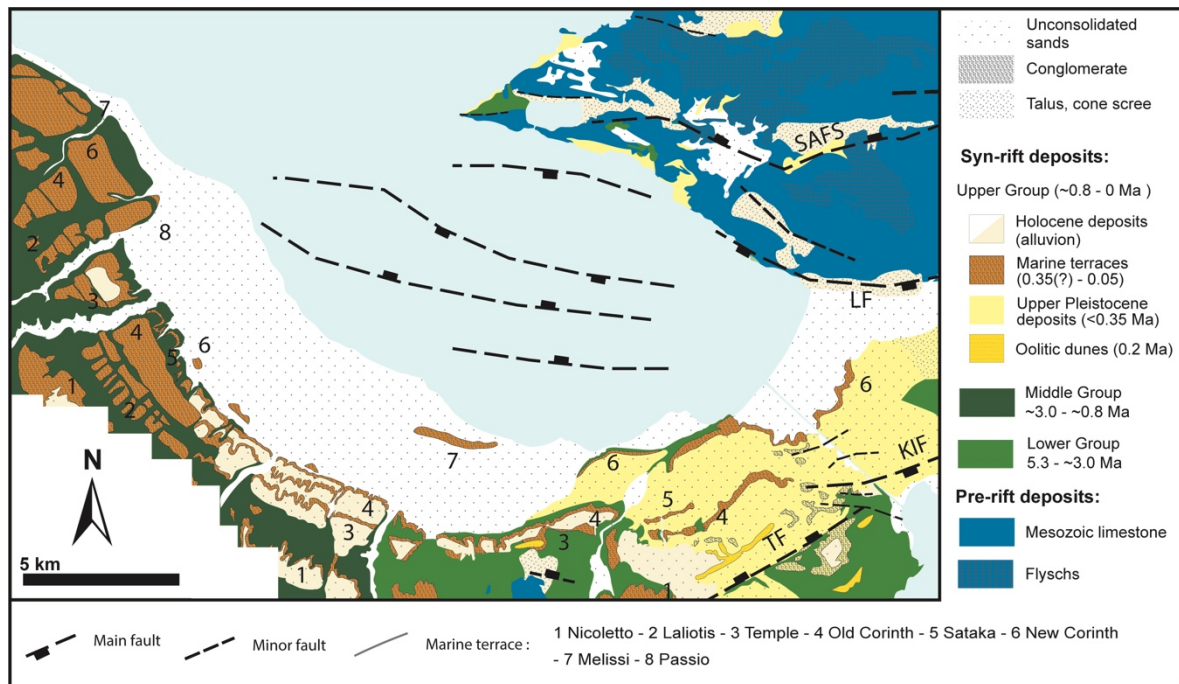


Figure 8. Carte géologique synthétique de la région de Corinthe : le golfe de Léchaion (modifiée de De Vals et Moretti, 2022).

Compilée et modifiée depuis les cartes géologiques de l'IGME, Armijo et al., 1996, Collier et al., 1990, Collier and Thompson, 1991, Keraudren and Sorel, 1987, Papanikolaou et al., 2015, Rohais and Moretti, 2017, Sébrier, 1977, von Freyberg, 1973. KIF: Kalamaki–Isthmia Fault; TF: Tamaris Fault; LF: Loutraki Fault; SAFS: South Alkyonides Fault System.

1.2.3 La région de Delphes

Le site archéologique de Delphes est localisé au centre de la nappe du Parnasse, sur la marge nord du Golfe de Corinthe, à environ 600 mètres d'altitude et 10 kilomètres de la côte, au pied du Mont Parnasse, qui s'élève à 2457 mètres au-dessus du niveau marin. Il se situe sur le toit d'une faille normale majeure à pendage sud, appelée la faille Arachova-Delphi-Amphissa. Une autre faille borde la vallée du Pléistocène, au sud de Delphes (Piccardi, 2000 ; Piccardi et al., 2008 ; Valkaniotis et al., 2011) (**Figure 9, A**).

Comme sur l'ensemble de la marge nord, il n'y a pas ou peu de dépôts syn-rifts plio-quadernaires dans la région de Delphes et le site repose directement sur la plateforme mésozoïque, les formations paléocènes et les débris de pente quadernaires (**Figure 9, B**).

D'après Celet (1962), la transition du Trias au Jurassique montre une sédimentation continue depuis un calcaire dolomitique (500 mètres au moins) jusqu'à des formations calcaires caractérisées par un niveau à Mégalodontes, datant le début du Jurassique. La série jurassique est marquée par deux horizons de bauxites, correspondants à deux épisodes d'émersion de la plateforme carbonatée : entre le Jurassique moyen et supérieur (fin Callovien) et à la transition Jurassique Crétacé (Tithonien) (Celet, 1962 ; Gielisch, 1993 ; Pomoni-Papaioannou, 1994 ; Carras, 1994). La série calcaire peut atteindre plus d'un kilomètre d'épaisseur, est bien stratifiée, mais pauvre en fossiles (horizons à oïdes, Pinnidés, Cladocoropsis et Clypeina ont été identifiés). La transition Trias – Jurassique et la sédimentation jurassique restent très peu étudiées encore aujourd'hui.

La série crétacée montre les taux de sédimentation maximum : plus d'un kilomètre de calcaires péri-récifaux peu profonds se sont déposés (calcaires à Ellipsactinies, Polypiers, Gastéropodes, oïdes, Nérinées) (Celet, 1962 ; Carras, 1995). Cette succession est marquée par plusieurs émerisions épisodiques et non homogènes dans la région, jusqu'à un troisième horizon principal de bauxite entre l'Aptien et le Coniacien (Bardossy et Mack, 1967 ; Fleury, 1980). Après cet évènement, la sédimentation reprend avec le dépôt de calcaires à rudistes. La paléogéographie de la région est alors très variable et les formations du Crétacé terminal présentent des variations latérales de faciès importantes : les séries à rudistes peuvent s'étendre jusqu'à la fin du Crétacé, ou être remplacées par les calcaires pélagiques finement lités à *Globotruncana* au Maastrichtien (Solakius, 1994).

Enfin, la limite Crétacé – Paléogène est marquée par une chute du niveau marin d'environ 130 mètres (Haq et al., 1987) : un hiatus sédimentaire s'observe avec formation d'un *hard-ground* et de surfaces de karstification (dans certaines localités, la sédimentation reste continue mais réduite). A l'Éocène, la sédimentation reprend avec un apport terrigène important et la formation de flysch (argiles rouges et flysch jaune) (Pomoni-Papaioannou et Solakius, 1991 ; Solakius et Pomoni-Papaioannou, 1993 ; Gregou, 1994 ; Gregou et al., 1994 ; Solakius, 1998 ; Solakius et Kati, 2001) (**Figure 9, B**).

Par-dessus ces unités mésozoïques et cénozoïques se sont déposées des formations récentes, des débris de pentes, dont la formation et l'âge sont très peu contraints. Sébrier (1977) identifie une brèche calcaire du Quaternaire ancien (dite brèche de Khrisso, du nom du village sous Delphes), consolidée et karstifiée, avec des clastes de calcaires anguleux et hétérométriques, allant jusqu'à 30 mètres d'épaisseur. Il la différencie d'une brèche plus

récente, visible à 500 mètres à l'ouest de Delphes : un tablier d'éboulis, épais d'une quinzaine de mètres, associé à la glaciation du Mindel (500 000 ans) (Biro, 1958 ; Péchoux, 1964 ; Sébrier, 1977). On retrouve des éboulis consolidés similaires sous le site de Delphes, qui reposent aussi en partie sur les flyschs éocènes.

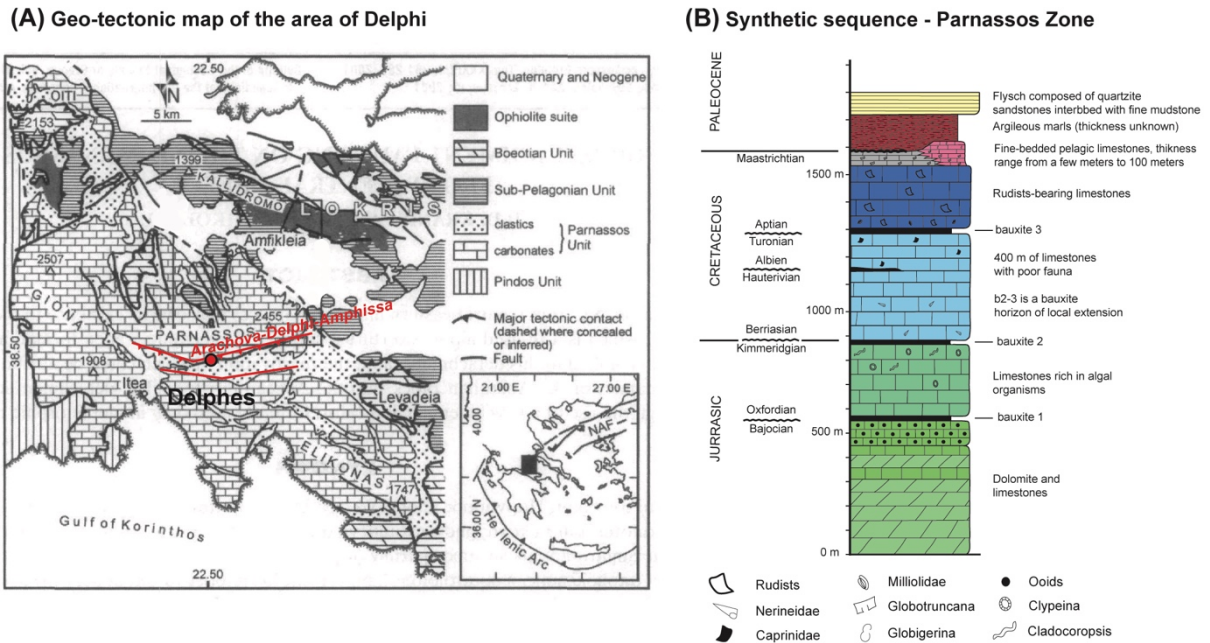


Figure 9. Carte géologique simplifiée de la région de Delphes (d'après Kranis et Papanikolaou, 2001) et colonne stratigraphique synthétique de la zone du Parnasse (modifiée d'après Fleury, 1980 ; Gielisch, 1993 ; Carras, 1995 ; Nirta et al., 2018).

1.3 État de l'art

L'état de l'art ci-dessous présente et remet en contexte nos connaissances sur les pierres calcaires de construction dans l'Antiquité grecque. Il a pour but de soulever les principaux axes de recherche sur les calcaires, en s'appuyant sur une bibliographie choisie pour sa représentativité. Pour rester dans le sujet de la thèse, la littérature sur les autres types de roches, en particulier les marbres, n'est pas abordée : elle est cependant dominante pour la période et la zone étudiée.

1.3.1 La pierre calcaire mise en œuvre

La pierre utilisée en tant que matériau de construction a fait l'objet de nombreuses études, mais **seules de rares synthèses existent** à l'échelle de la Grèce ou traitant les types de roches autres que les marbres.

Les grands ouvrages d'architecture et dictionnaires archéologiques abordent le sujet, cependant sans détail (Martin 1965; Orlandos 1968; Ginouvès *et al.* 1985). R. Martin propose une synthèse de 40 pages sur les différents types de roches, les regroupant en 6 catégories : brèche et conglomérat, tuf ou « *pôros* », granite, gneiss, calcaires et marbres. Cependant, on peut remarquer quelques lacunes : uniquement deux pages servent à décrire les « *pôros* », terme générique pour parler de roches sédimentaires tendres avec une forte porosité, alors qu'une dizaine se concentrent sur les marbres. De même, A. Orlandos ne propose qu'une dizaine de pages sur ces questions, dont deux sur les « *pôros* » et cinq sur les marbres. Dans son dictionnaire, R. Ginouvès produit une liste complète des termes employés par les archéologues pour les types de pierre utilisées dans la construction et la sculpture. Cette liste illustre et contient cependant des confusions du point de vue de la réalité géologique de certains termes.

La littérature anglophone se penche sur la question, mais souvent à l'échelle du bassin méditerranéen. *The Oxford Handbook of Greek and Roman Art and Architecture*, un chapitre d'une vingtaine de pages s'intéresse aux matériaux de construction et aux techniques dans l'architecture grecque et romaine (Marconi & Tucci 2014).

Généralement, il faut se tourner vers les projets pluridisciplinaires et/ou régionaux sur la pierre en contexte archéologique, pour avoir une approche synthétique. Ils ont permis la publication d'importants ouvrages rassemblant des études de cas variées, ou des ouvrages à l'échelle d'une zone géographique ou d'une période restreinte. On peut citer par exemple l'ouvrage de Joseph W. Shaw sur les matériaux dans l'architecture minoenne (Shaw 2009). Les publications d'ASMOSIA (*Association for the Study of Marbles and Other Stones in Antiquity*), faisant suite à un colloque international se déroulant tous les trois ans depuis 1988, ont permis de regrouper des études sur les marbres en Grèce et Rome antiques en particulier. Les sujets se sont diversifiés en traitant par exemple aussi les grès, obsidiennes et granites dans un cadre chronologique plus large (Herz & Waelkens 1988; Waelkens *et al.* 1992; Jockey 2009).

Les études sur les matériaux de construction peuvent être abordés de deux façons : en travaillant sur les sites archéologiques même, ou sur les carrières (voir la partie suivante [1.3.2](#)).

Parfois, ils peuvent être étudiés ensemble si une ou plusieurs carrières ont été associées à un site de construction. Cependant, des travaux similaires à ceux en cours à Delphes et à Délos, restent, à notre connaissance, assez rares sur le territoire grec.

Athènes a évidemment fait l'objet très tôt d'une publication sur les pierres employées (Wycherley 1978, 2015), avec entre-temps des études scientifiques réalisées sur la nature et la provenance des roches (Theoulakis & Bardanis 2000; Kouzeli & Dimou 2009). De même, les matériaux employés au temple de Bassae ont été analysés (Theoulakis *et al.* 1988) : les études semblaient limitées aux vestiges imposants, ou les plus connus. Il faut surtout attendre les années 1990 et 2000 pour voir des publications sur l'identification archéométrique et systématique des pierres mises en œuvre, autres que les marbres, à l'échelle d'un site archéologique : à Malia, en Crète (Dimou *et al.* 2000), ou à Épidaure, où Varti-Matarangas & Matarangas (2000) identifient une douzaine de faciès dans le site archéologique de l'Asclépiéion. En Thrace, une étude menée dans trois sites archéologiques sur la nature des roches en fonction de leur utilisation dans le bâti (Xidakis *et al.* 1990) reste à ce jour le seul exemple d'une approche combinée entre matériau et utilisation.

Il faut noter quelques publications liant l'analyse des matériaux de construction et de l'environnement à une échelle plus grande : en premier lieu, le guide de Higgins & Higgins (1996), propose un tour des grands sites archéologiques de Grèce et une description succincte des contextes géologiques respectifs. Des projets, comme celui sur le site de Goritsa, près de Volos (Thessalie), s'intéresse à l'exploitation de la pierre en relation avec la construction du site (Bakhuizen & Goritsa Team 1992). Mais c'est aussi à partir des années 2000 que la tendance se développe : les travaux à Despotiko, sur l'île d'Antiparos (Draganits 2009), en Macédoine (Koukouvou 2020) et, très récemment, ceux réalisés dans la cité de Sicyone (Lolos 2021). La région d'Olympie a aussi fait l'objet d'une étude géologique et géomorphologique pour comprendre l'implantation du site (Davis 2018).

La pierre calcaire de construction n'est pas ignorée mais ne fait pas l'objet d'une publication : plutôt un rapport de quelques pages, comme par exemple, pour le site de Palaikastro en Crète (MacGillivray *et al.* 1984) ou le site de l'Héraion d'Argos (Pfaff 2003). De ce fait, il est difficile d'observer des motifs ou un modèle à grande échelle pour la nature et l'utilisation des matériaux de construction. La question de la provenance étant un peu à part, déjà bien renseignée notamment pour les marbres, mais toujours d'actualité (Vettor *et al.* 2021, 2022), elle sera vue avec les carrières (voir [1.3.2](#)).

Hors de Grèce, il existe une multitude d'études synthétiques sur la nature des matériaux de construction de sites ou de régions entières. Par exemple, la pierre a été étudiée sur le site archéologique de Teotihuacan, au Mexique (Barba *et al.* 2009; Miriello *et al.* 2011); de Mégara Hyblaea, en Sicile (Mège *et al.* 2020); à Sagalassos en Turquie (Degryse *et al.* 2003) ; dans le Diocèse de Vitoria, en Espagne (Martínez-Torres 2007) ; dans la cathédrale de Reims, en France (Turmel *et al.* 2014). Des villes modernes, comme à Bromyard, Angleterre, s'intéressent aussi aux roches employées dans la construction et développent des bases de données sur les carrières (Carter *et al.* 2017). Pour les études régionales, les travaux réalisés sur l'île de Malte (Bianco 2017, 2019), en Saxe (Götze *et al.* 2007) et en Bavière (Flügel 1999), Allemagne, sont de bons exemples de l'intérêt d'une approche plus large.

Ces études nous montrent que le sujet est porteur et l'intérêt que les pierres possèdent pour la recherche historique et archéologique. Elles restent cependant souvent liées à l'étude et la mise en valeur des carrières associées.

1.3.2 Les carrières de pierre calcaire

Le sujet de la thèse n'est pas l'étude des carrières antiques comme objet archéologique, mais comme « objet géologique ». Cependant, l'exploitation de la pierre dans l'Antiquité fait aussi l'objet de plusieurs études concernant l'organisation des chantiers (Korrès 1995), l'outillage (Bessac 1986), le coût des matériaux (Mathé 2010) ou les artisans (Feyel 1998). Cependant, assez peu d'articles expriment un intérêt sur la nature même de la roche extraite.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur le problème de la réalisation de bases de données sur les carrières antiques. Avec l'œuvre de Ward-Perkins (1972), l'ouvrage *Quarries in Ancient Greece* de Dworakowska (1975) reste une œuvre fondamentale sur les carrières en Grèce et leur exploitation. Le travail de L. Lazzarini, synthétisé dans son ouvrage *Poikiloi lithoi, versicolores maculae* (Lazzarini 2007) qui regroupe trente ans de recherches, s'intéresse aux pierres colorées de Grèce (employées à différentes périodes) et constitue une base de données primordiale pour l'étude des matériaux antiques. Plus récemment, Kokkorou-Alevra *et al.* (2014) ont publié un corpus regroupant 940 localisations de carrières (marbres, calcaires, brèches) dans l'ensemble du territoire grec.

Ces démarches ne sont pas limitées au monde hellénique. On peut citer les travaux sur les impressionnantes carrières d'Égypte (Harrell 1992; Klemm & Klemm 2001), avec notamment le projet *QuarryScope* (2005-2008) et la publication d'un ouvrage de référence et

d'un atlas en ligne sur les carrières antiques d'Égypte, mais aussi de Jordanie, Turquie et Grèce (Abu-Jaber *et al.* 2009). Pour le monde romain, le *Stone Quarries Database* de B. Russell, accessible en ligne, répertorie les carrières antiques sur le territoire romain, en Italie mais aussi en Grèce (Russell 2013, 2017). Parfois, les publications se concentrent sur certains types de roches, comme les marbres, mais aussi les granites (Galetti *et al.* 1992). Souvent, l'étude des carrières a pour but d'enrichir ces bases de données : par exemple, la carrière de calcaire noir à Teos, en Turquie, et la carrière de calcaire noir à Chios, en Grèce, ont fait l'objet d'une publication sur les calcaires sombres dans l'optique d'enrichir une *database* de carrières romaines (Brilli *et al.* 2010, 2019).

Ce besoin de faire des bases de données s'accompagne de **lithothèques de référence**. Les premières collections datent du XVIII^e siècle mais étaient regroupées dans un but décoratif surtout, et non scientifique (Lazzarini 2004). Pour les collections scientifiques modernes, une des plus connues est la *Corsi Collection of Decorative Stones*, regroupée par un avocat romain du début du XIX^e siècle - Faustino Corsi. Accessible en ligne, c'est une collection de pierres décoratives d'Italie et d'autres pays, dont 64 échantillons de Grèce, majoritairement du marbre, mais aussi de la brèche et des calcaires. Elle est actuellement au Musée d'Histoire Naturelle de l'Université d'Oxford. En Angleterre aussi, la *John Watson Building Stones Collection* possède des échantillons des carrières modernes de Grèce (Watson 1916), au *Segwick Museum of Earth Sciences*, à Cambridge.

On peut citer aussi la *Lepsius Marble Collection*, regroupé par Richard Lepsius au XX^e siècle, actuellement au Musée de Darmstadt. Ce sont des échantillons de Grèce, majoritairement des marbres, provenant de ses études sur le métamorphisme de l'Attique et ses travaux avec les archéologues (Lepsius 1890, 1893; Moltesen 1994).

En Grèce aujourd'hui, un laboratoire de contrôle accrédité par l'H.S.G.M.E (*Hellenic Survey of Geology and Mineral Exploration*, anciennement I.G.M.E.), appelé *LITHOS Laboratory*, possède aussi une collection de marbres méditerranéens (ainsi que des calcaires et des brèches) destinée au marché de la pierre décorative. L'*American School of Classical Studies at Athens* (ASCSA) et le *Wiener Laboratory*, spécialisé dans les sciences archéologiques, sont aussi en possession d'une *Lithic Reference Collection* de pierres pour la Grèce : des spécimens macroscopiques et des lames minces pour des marbres cycladiques, des marbres du Péloponnèse et des calcaires oolithiques de Corinthe entre autres.

Mais ces études concernent en priorité les marbres, et les **études des carrières de calcaire restent ponctuelles**. Pourtant, dans l'ouvrage de Kokkorou-Alevra *et al.* (2014), sur les 940 carrières inventoriées, presque la moitié sont des carrières de roches sédimentaires (calcaires, grès, calcaires bioclastiques, travertins...).

Les études sur les carrières de pierres calcaires concernent des territoires et des périodes très variés, mais se concentrent surtout sur les traces d'extraction et l'utilisation de la pierre dans les sites archéologiques voisins. Par exemple, c'est le cas pour les carrières de travertin sur l'île de Kos (Chatziconstantinou & Poupaki 2002), les carrières souterraines de calcaire à Samos (Tziligkaki & Stamatakis 2018), ou les carrières de grès de l'île de Cythère (Kokkorou-Alevras *et al.* 2009). Des carrières de Delphes ont aussi déjà été étudiées (Amandry 1981; Perrier *et al.* 2022), comme une carrière près de Malia (Guest-Papamanoli 1989). Cette liste n'est pas exhaustive, mais montre la tendance à identifier les carrières de calcaire locales, mais sans une approche archéométrique.

Cependant, quelques rares régions en Grèce font l'objet d'une étude géologique systématique. On peut noter les travaux dans la région de Corinthe, connue pour sa tradition d'exploitation du *pòros*, par Ch. Hayward (Brookes 1981; Rhodes 1987; Hayward 1996; Lolos 2002; Hayward & Pitt 2017). Ponctuellement, de grandes carrières de calcaire, pour l'exportation ou non, ont été étudiées extensivement : les carrières d'Asomata et Veroia, en Macédoine, ont fourni du travertin pour plusieurs sites dans la région (Koukouvou 2010, 2012) ; les carrières du Pirée ont été exploitées notamment pour la construction d'Athènes, mais les faciès extraits n'ont jamais été clairement définis (von Eickstedt 1991; Theoulakis & Bardanis 2000) ; les carrières de Tyrnavos, en Thessalie (Melfos *et al.* 2016) ; les carrières de Kléonai ont été étudiées lors de sa thèse par Marchand (2002), mais n'ont jamais fait l'objet d'une publication ; finalement, sur la côte nord de l'île d'Égine, plusieurs carrières ont été identifiées (Wurster 1969) et auraient produit des pierres pour la construction à Égine même, ainsi qu'Athènes, Éleusis, Sounion et Kéa (voir les références dans Kokkorou-Alevra *et al.* (2014)). La région sud de l'Eubée, avant la période romaine et l'exportation de ses marbres de couleur, produisait d'autres roches exportées à l'échelle locale (Chidiroglou 2015).

Pour synthétiser, à part quelques grands centres carriers connus, et des études ponctuelles, les carrières de calcaire ne sont pas décrites et caractérisées géologiquement de façon précise. Ce manque de connaissances a des répercussions sur la préservation de ces vestiges archéologiques et l'orientation des recherches sur les pierres calcaires employées dans

la construction. Nos observations de terrain nous montrent en effet une dégradation des carrières de calcaire : celles du Pirée ont aujourd'hui presque disparu, et les carrières de Kléonai sont aujourd'hui traversées par une autoroute, pour ne citer que deux exemples.

1.3.3 L'analyse des pierres calcaires

Il existe de nombreux protocoles d'étude sur les pierres calcaires employées pour la construction. On peut tirer les grandes lignes de l'analyse des pierres calcaires et leur utilité : puisqu'elles représentent le volume principal de roche mise en œuvre, comprendre leurs propriétés reste indispensable. Plusieurs axes de recherches ressortent de la littérature scientifique :

- Les analyses pour retrouver la **provenance** : la recherche de critères diagnostiques pour identifier les sources de calcaires, et la méthodologie globale à adopter, est abordée par exemple dans Malfilatre (2012) en France. Les calcaires regroupant des faciès très variés, la méthodologie n'est pas encore systématique et varie en fonction des contextes géologiques.
- Les études pour améliorer la compréhension **des connaissances techniques** des civilisations anciennes : les techniques d'extractions, la mise en œuvre et le choix des pierres dépendent en partie des propriétés des roches (Jackson *et al.* 2005; Agaiby *et al.* 2013).
- Enfin, la recherche tournée vers la **conservation** et la **restauration** des sites archéologiques : les calcaires sont des roches moins durables que les marbres ou les granites, la construction en calcaire est donc sujette plus rapidement à l'érosion (Török & Přikryl 2010).

Certaines caractéristiques physiques influent directement sur l'utilisation des pierres dans la construction. La densité est un facteur essentiel et les roches les plus légères sont employées en élévation. La composition minéralogique, en particulier la présence d'argiles, influe directement sur l'altération des pierres (Tiennot 2017). Les mesures des propriétés mécaniques, par des moyens destructifs ou non-invasifs, sur les matériaux de construction, permettent surtout d'estimer la durabilité de la roche (Benavente *et al.* 2004; El Amrani & El Azhari 2009; Drdáck *et al.* 2012).

La porosité, et surtout le type de réseau poreux, agit sur de nombreuses caractéristiques de la roche : il dicte en particulier les transferts d'eau, un des facteurs les plus importants dans la construction (Trechsel 1994). Le réseau poreux se définit comme la nature, la taille et l'organisation des pores dans la roche, qui dépend de la taille des grains, leurs formes, le ciment et donc du degré de compaction. Les propriétés hydriques – absorption, évaporation, capillarité - des roches dépendent en particulier de la porosité ouverte (les pores liés entre eux et accessibles à l'eau) (Valdeon *et al.* 1992).

L'eau est donc un des principaux agents à l'origine de la dégradation des roches calcaires : avec les phénomènes de dissolution, gel-dégel, et l'érosion chimique (Walbert 2015). La durabilité d'une pierre dépend de ses propriétés physiques mais aussi de sa texture et sa composition : une roche hétérogène et poreuse se dégradera plus vite (Beck 2006; Benavente *et al.* 2008).

1.4 Synthèse

1.4.1 Acquis et zones d'ombres

Avec le contexte géologique et l'état de l'art définis, il est assez aisé de tirer certaines conclusions préliminaires, qui serviront de fil conducteur pour notre étude.

Premièrement, dans la zone géographique étudiée sont présentes majoritairement des **roches sédimentaires** : il n'y a presque pas de formations métamorphiques ni magmatiques à l'affleurement (voir [1.2](#)). Cela signifie que les marbres, granites ou autres roches de ce type doivent être considérés par défaut comme allochtones. Des formations non sédimentaires se retrouvent cependant aux limites de notre zone d'étude : des roches magmatiques (andésites, dacites) se retrouvent dans la péninsule de Méthane, ancien volcan, située à l'est de Corinthe sur le Golfe Saronique ; on observe aussi localement des formations métamorphiques dans le bassin de Phénéos (zone des Phyllites-Quartzites dans le Péloponnèse).

Alors que les études de cas se développent à grande échelle, sur différents sites archéologiques dans le monde, il y a assez peu d'études systématiques réalisées sur le territoire grec, et encore moins sur **la construction en calcaire** (voir [1.3.1](#)). Les travaux de recherche se concentrent encore beaucoup sur les marbres, et les carrières associées sont aussi les plus connues et étudiées. Si cela peut s'expliquer par la prédominance du marbre dans les échanges de pierre, ce biais dans la littérature fait que les pierres calcaires sont souvent ignorées lors de l'étude d'un site archéologique. De fait, la méconnaissance des carrières de calcaires et des roches sédimentaires extraites entretient le manque d'intérêt pour ce sujet (voir [1.3.2](#)).

Parmi les roches sédimentaires, toutes les grandes familles de roches sont représentées en Grèce : des **roches détritiques** (conglomérats, grès), des **roches carbonatées** (calcaires pré-rifts : *mudstones*, *wackestones*) et, dans une moindre mesure, des **roches bio-chimiques** (travertin, stromatolithe). Elles présentent des faciès très variés, différents macroscopiquement : la méthodologie appliquée doit prendre en compte alors cette hétérogénéité des faciès (voir [1.3.3](#)).

1.4.2 La question centrale : la définition des « *pôros* »

Concernant les matériaux mis en œuvre dans l'Antiquité grecque, le manque de concordance entre ce qui est décrit dans la littérature archéologique et les observations

géologiques peut être, en partie, imputé aux disparités de vocabulaire entre les deux spécialités. La principale source de confusion semble venir du terme « *pôros* », qui n'a aucune signification géologique mais qui est extensivement employé dans la littérature archéologique pour décrire des faciès tendres. Une définition précise du terme « *pôros* » était donc nécessaire pour traiter des pierres calcaires utilisées en construction.

Cette confusion a déjà été soulevée dès les premières publications sur des sites archéologiques (Blümner 1884; Waldstein & Washington 1891; Pomtow 1907; Washington 1923) mais aussi lors des premières études géologiques de terrain (Fuchs 1877; Lepsius 1890; Philippson 1892) et d'explorations géographiques de Grèce (Ross 1855; Neumann & Partsch 1885). Récemment, Hayward (2003) décrit très justement le problème de terminologie lié au mot « *pôros* », dans son étude sur les carrières de Corinthe, mais ne propose pas de termes pour le remplacer.

Ce mot regroupe toutes les pierres assez tendres présentant une forte porosité, en opposition aux autres roches dures (calcaires, marbres, roches magmatiques et volcaniques). Pratique pour englober des pierres aux propriétés similaires (du point de vue de la densité par exemple), son utilisation efface cependant la diversité des pierres mises en œuvre : les calcaires marins coquilliers, les dunes oolitiques, les travertins, les stromatolithes, les dépôts volcano-clastiques et les grès au sens strict, sont tous appelés « *pôros* » alors qu'ils sont différents, et donc d'origines variées. L'utilisation de ce terme entraîne donc une perte d'informations historiques.

Ainsi, une nouvelle classification des « *pôros* » en particulier, mais aussi des autres calcaires, doit être mise en place pour pouvoir : 1) mieux identifier la variété des faciès mis en œuvre dans un site, 2) donner des outils pour décrire des roches de façon plus précise, 3) permettre ensuite et surtout de comparer les sites archéologiques entre eux.

1.4.3 Problématiques de la thèse

Cette thèse se propose d'établir les grandes lignes de l'utilisation des pierres calcaires dans les sites archéologiques du Golfe de Corinthe. Les principales questions auxquelles elle souhaite répondre sont donc les suivantes :

- **Quels types de pierre sont employés** dans la construction monumentale antique, dans la région du Golfe de Corinthe ? Cela doit passer par l'établissement d'un inventaire des

roches mises en œuvre, en fonction de leur nature et leur utilisation, pour alimenter une base de données sur les matériaux de constructions.

- **D'où proviennent ces pierres employées ?** Sont-elles d'origine locale, régionale ou allochtone, et dans quelles proportions ? La recherche des carrières antiques ayant fourni les sites en pierre est donc nécessaire.
- **Pourquoi ces pierres ont-elles été choisies ?** Les constructeurs grecs avaient-ils une « conscience géotechnique » (densité, porosité...) de la pierre ? Pour cela, les analyses pétro-mécaniques permettront de caractériser les roches, à comparer avec leur utilisation dans les monuments.

2 Méthodologie

Sommaire

[2.1 Introduction](#)

[2.2 Classification des roches mises en œuvre](#)

[2.2.1 Description macroscopique du site](#)

[2.2.2 Identification des carrières antiques](#)

[2.3 Approches statistiques](#)

[2.3.1 Comparaison à l'échelle du Golfe de Corinthe](#)

[2.3.3 Prise en compte de l'environnement et l'histoire des sites](#)

[2.4 Analyses pétrographiques et minéralogiques en laboratoire](#)

[2.4.1 Description macroscopique](#)

[2.4.2 Microscopie optique](#)

[2.4.3 Diffractométrie au Rayon X \(DRX\)](#)

[2.5 Caractérisation physique des pierres](#)

[2.5.1 Porosimétrie par saturation à l'eau](#)

[2.5.2 Mesures de densités](#)

[2.5.3 Porosimétrie par intrusion au mercure](#)

[2.5.4 Imbibition capillaire](#)

[2.6 Propriétés mécaniques des roches](#)

[2.6.1 Mesures acoustiques](#)

[2.6.2 Résistance à la propagation d'une fissure : essai SCB](#)

[2.6.3 Résistance à l'extension : essai brésilien](#)

[2.6.4 Résistance à la compression : essai UCS](#)

[2.7 Synthèse](#)

2.1 Introduction

Un des buts de cette thèse était de mettre en place un protocole pour l'étude des matériaux de construction et de l'environnement géologique d'un site archéologique. C'est à Delphes, qui a servi de « site expérimental », que nous avons pu l'établir. La méthodologie appliquée devait répondre en premier lieu aux contraintes liées à son application sur les blocs de pierre archéologiques. Les principaux facteurs qui ont orienté le choix des méthodes peuvent être synthétisés ainsi :

- **L'étude sur site archéologique.** Les analyses sur site étaient limitées aux observations, pour des raisons pratiques et réglementaires. Les objets étudiés sont des blocs de construction (en moyenne 40x40x60 cm, mais pouvant atteindre jusque 2 mètres et plusieurs centaines de kilos), ils ne peuvent pas être transportés. L'impossibilité d'échantillonner dans les sites élimine une grande partie des analyses classiquement utilisées dans ce domaine, les autorisations nécessaires des autorités grecques étant très difficiles à obtenir. Inversement, la majorité des instruments d'analyse ne sont pas portables.
- **La zone étudiée, le Golfe de Corinthe.** Ce sont majoritairement des roches sédimentaires, aux faciès variés et hétérogènes, qui affleurent dans la région (voir [1.2.2](#)). Or, nous avons vu que les calcaires n'ont fait l'objet ni de bases de données, ni d'une étude archéométrique systématique, puisqu'ils étaient souvent ignorés jusqu'alors (voir [1.3.2](#)).
- **La question pratique.** La zone d'étude est large, géographiquement et temporellement, avec 37 sites archéologiques et 25 carrières étudiés, répartis sur une zone géographique de plus de 10 000 km². La question de la pertinence et de l'efficacité des analyses est donc cruciale. Un accès aux sites archéologiques, comme à Delphes, nécessite de poser des demandes d'autorisation (en précisant les objets à étudier, les numéros d'inventaire, comment ils seront étudiés, avec qui et à quelle date) au minimum un an à l'avance, ce qui laisse peu de marge de manœuvre, sans assurance de les obtenir.

Cependant, comprendre pourquoi certains faciès ont été employés dans la construction nécessite de faire des analyses invasives et destructives. Retrouver les carrières est donc une étape primordiale pour pouvoir échantillonner, ce qui n'a pas toujours été possible. Ainsi, nous avons dû nous adapter aux échantillons et aux méthodes disponibles : certaines analyses n'ont été réalisées que sur une partie des échantillons, ce qui sera précisé dans les résultats. Dans cette partie, nous présenterons les méthodes validées, pour leur pertinence et leur faisabilité, tout en évoquant brièvement d'autres méthodes peu conclusives.

2.2 Classification des roches mises en œuvre

2.2.1 Description macroscopique sur site

Pour chaque site archéologique, nous avons répertorié les lithologies employées dans le bâti : description macroscopique, à l'œil nu et à la loupe, et documentation photographique. A

Delphes, l'utilisation d'un microscope portable (Dino-lite®) a permis d'obtenir des photographies de l'ordre des premiers grossissements d'un microscope optique normal (x5 à x10), et donc d'affiner nos descriptions pétrographiques (**Figure 10**) : cela n'a été possible que sur ce site car des autorisations sont nécessaires.



Figure 10. Dino-Lite ® (microscope digital portable) de l'EFA.

Utilisé à Delphes, il se branche à un ordinateur portable. A droite, exemple d'imagerie obtenue avec : zoom sur un *grainstone* oolithique (environ 0,2 mm de diamètre) employé à Delphes.

A l'exception de Delphes, les analyses étaient limitées à des observations macroscopiques sur site. Certains sites étaient libres d'accès et nous avons la possibilité de regarder les blocs de près et d'obtenir une description pétrographique précise (dans la limite du possible). D'autres étaient aménagés pour le tourisme, et les blocs n'étaient pas accessibles. A cela s'ajoute les biais liés au travail sur des vestiges archéologiques : les monuments sont généralement en ruine, voir totalement détruits, les blocs sont altérés par des siècles d'exposition à l'air libre, ou parfois les vestiges sont simplement inaccessibles (remblayés pour les conserver, ou fermés pour les préserver).

Des observations à l'œil nu ne sont donc pas toujours suffisantes pour documenter entièrement un site : un travail bibliographique important était nécessaire. Dans les rapports de fouilles, comptes-rendus, monographies et autres publications, sont souvent mentionnées les roches mises en œuvre, leur nature et parfois leur provenance. A défaut d'autres informations, surtout quand les vestiges ont disparu ou le site est inaccessible, nous avons compilé ces données : les informations tirées de la littérature seront indiquées explicitement. Cette approche littéraire, inhabituelle en sciences de la Terre, a pour but de documenter systématiquement des

objets jusqu'alors souvent ignorés. Mais il faut prendre avec précaution ces informations, car la nature géologique exacte des pierres est rarement précisée.

Les objets étudiés étant presque uniquement des roches sédimentaires (à l'exception des marbres), les classifications classiques de sédimentologie sont utilisées (Dunham 1962; Strohmenger & Wirsing 1991; Flügel 2004). Un intérêt particulier est porté sur les caractéristiques macroscopiques des roches : les éléments constitutifs (les minéraux et les clastes (contenu fossilifère, grains, lithoclastes), leurs formes et répartition), la structure (les figures sédimentaires, le litage ou débit). En vue de leur utilisation en tant que matériaux de construction, les roches seront aussi décrites par leur couleur, dureté, fracturation et parfois altération. En [Annexe E](#), un glossaire géologique des termes employés dans la thèse est présenté pour faciliter la lecture.

En effet, il faut garder en tête que les constructeurs grecs n'avaient pas conscience de la nature même de la roche : ce sont les « caractéristiques macroscopiques » qui devaient être déterminantes dans le choix d'une roche, même s'ils avaient des notions de bases de géologie (Rebrik *et al.* 1987). Ainsi, les roches ont été nommées selon une **nouvelle classification des pierres de construction inédite**, adaptée à l'échelle du Golfe de Corinthe, basée sur la description géologique et les propriétés physiques des roches (voir [2.4](#) et [2.5](#)). Les termes employés proviennent de la géologie mais sont adaptés au contexte archéologique :

- Les calcaires durs : Ils regroupent les faciès avec une très faible porosité, donc une densité élevée (autour de 2,7). De couleurs variées, ils sont employés pour les fondations, les premières assises et certains murs, mais très rarement en élévation – sauf dans des volumes restreints. Ils s'altèrent peu, mais possèdent un comportement cassant.
- Les conglomérats : De densités variables et de natures variées, les conglomérats regroupent les faciès issus de la fragmentation d'autres roches (faciès détritiques, ou brèches tectoniques), avec des clastes centimétriques à décimétriques. Hétérogènes (couleur et texture), ils sont généralement employés pour les fondations, les murs de soutènement, ou des parties non visibles.
- Les grès : Ce terme est utilisé improprement : ils regroupent les roches formées de grains inférieurs à 2 millimètres, qui présentent une densité faible (autour de 1,7) et une micro-porosité, et dont l'aspect est plus homogène (que les conglomérats par exemple). La nature et la forme des grains ne sont pas pris en compte. Ils sont donc plus fragiles, mais ne cassent

pas : ils sont employés pour les parties architectoniques et sculptées (murs, colonnes, fronton).

- Les travertins : Ce terme est utilisé improprement car il regroupe les formations calcaires continentales d'eau chaude (travertin) et d'eau froide (tuf). De densité faible (autour de 1,7) avec une macro-porosité, les travertins sont des faciès grossiers et hétérogènes : ils sont plutôt fragiles, mais possèdent un comportement cassant. Ils sont utilisés en élévation (colonne, murs) mais ne semblent pas être recherchés pour les parties sculptées.
- Les calcaires tendres : De densité moyenne (autour de 2) avec une micro et/ou macro-porosité, ils sont généralement coquilliers mais peuvent correspondre aussi aux faciès détritiques peu consolidés. Hétérogènes, ils s'altèrent assez facilement : ils ne sont généralement pas employés à l'air libre.
- Les marbres : Cela correspond aux roches métamorphiques issues des calcaires, avec une densité élevée (2,7) sans porosité, pouvant être polis. Généralement de couleur blanche, ils ont un comportement cassant. Ils sont utilisés pour la sculpture et les parties architecturales sculptées, mais très rarement dans le bâti.

2.2.2 Identification des carrières antiques

Comme pour l'étude des matériaux, et peut-être de façon plus prononcée, identifier la provenance des roches nécessite de passer par d'autres disciplines : l'histoire, l'histoire de l'art, l'archéologie... L'étude du contexte géologique de chaque site, combinée avec la description des faciès mis en œuvre, permet de restreindre facilement l'origine des faciès : si le faciès est local ou non, par opposition à régional, voire allochtone.

Une roche locale est présente dans l'environnement immédiat du site archéologique (substrat, ou les premiers reliefs alentours). Une roche considérée comme régionale provient de la région d'influence du site : basée sur des critères historiques, parfois topographiques (bassin fermé), qui a nécessité un transport par voie terrestre. Elles ont donc été choisies et transportées sur quelques kilomètres. Les roches allochtones correspondent à celles qui ont parcouru généralement plusieurs dizaines de kilomètres, par voies terrestre et maritime. Cette classification est adaptée au Golfe de Corinthe et ses caractéristiques topographiques : la définition de l'origine peut être différente pour les îles par exemple.

Le Golfe de Corinthe est une région très bien documentée, surtout la marge sud (voir [1.2.2](#)) : de la même façon qu'à l'échelle locale, notre connaissance de la géologie fine des

formations du Golfe nous permet en premier lieu de discriminer les faciès régionaux des faciès allochtones (hors du Golfe).

Un travail bibliographique important est nécessaire et permet de coupler les indices géologiques et historiques. Nous avons déjà dit que la littérature ancienne et moderne aborde souvent la question de la nature et l'origine des matériaux, parfois avec une faible précision : elle reste néanmoins importante car elle représente des pistes de recherche. De même, les anciennes études géologiques recèlent parfois d'informations similaires, les scientifiques du XIXe et XXe siècles ayant eu des démarches plus naturalistes et descriptives. Par exemple, le géologue Theodoropoulos (1968) mentionne, dans une des premières études géologiques du bassin de Mégare, des carrières de « *pôros* » exploitées par les anciens et indique sur sa carte géologique des emplacements de carrières abandonnées (**Figure 11, A**). Les carrières peuvent aussi être repérées sur d'autres supports littéraires : de vieilles cartes (**Figure 11, B**), ou par exemple, une note dans une chronique de fouilles qui a permis de retrouver l'affleurement sur *Google Earth*, puis sur le terrain (**Figure 11, C**).

Ensuite, un travail d'exploration est nécessaire pour identifier les carrières antiques sur le terrain. C'est cependant une exploration réfléchie, car l'entreprise serait impossible sans préparation, la zone d'étude étant grande :

- **Une préparation sur des cartes et vues aériennes (Google Earth)** permet de repérer certaines carrières visibles et vérifier les données tirées de la littérature. On reconnaît une carrière antique sur plusieurs critères, une exploitation de grande ampleur laisse souvent des traces dans le paysage : absence de végétation, fronts de tailles verticaux (formes géométriques en vue aérienne) (**Figure 11, D**), cônes de débris de taille.
- **Le bon sens.** Cela reste fondamental : on cherche les carrières au plus près du site archéologique d'abord, en particulier pour les gros volumes. Si deux affleurements du même faciès ont pu produire des blocs, mais que l'on ne possède pas de preuve d'exploitation dans l'un ou l'autre, l'hypothèse la plus proche est alors privilégiée. Comme la distance, la topographie est prise en compte (dénivelé et trajet entre la carrière et le site).
- **La comparaison à grande échelle.** Les techniques de construction pouvaient avoir des motifs régionaux, liés à la nature des roches utilisées (Martin 1965). Ainsi, si un faciès se retrouve dans plusieurs sites proches, cela pourrait indiquer une provenance locale.

Cependant, une description macroscopique seule n'est pas suffisante pour identifier et s'assurer d'une provenance. Cela est particulièrement difficile pour les faciès allochtones, les roches importées, encore plus sans données historiques ou archéologiques. Nous émettons donc majoritairement des hypothèses, basées sur des arguments géologiques, que l'on pourra vérifier dans des études futures (demande d'autorisation pour échantillonnage).

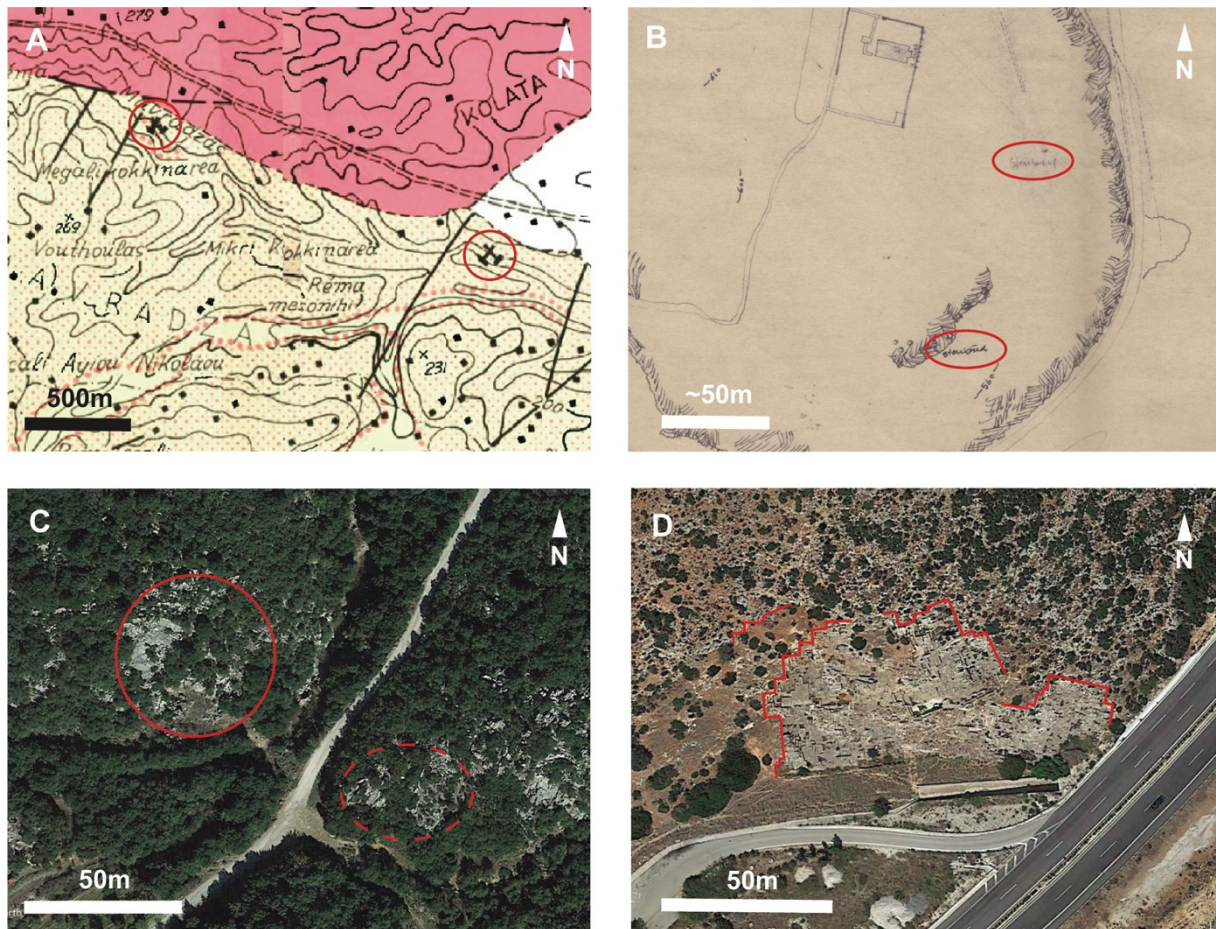


Figure 11. La recherche des carrières : les préparations.

A : extrait de la carte géologique de Théodoropoulos (1968), avec des carrières abandonnées identifiées. B : extrait d'une esquisse de carte trouvée à la Maison de fouilles de Delphes, non datée et sans auteur, mais indiquant l'emplacement de carrières (« steinbrüche ») qui ont été retrouvées. C : affleurements de calcaire retrouvés en suivant les indications de Piérart et al. (1987), qui ont pu fournir la pierre noire d'Argos. D : les carrières de Kléonai, décrites dans Marchand (2003), sont clairement visibles en vue aérienne.

2.3 Approches statistiques

2.3.1 Comparaison à l'échelle du Golfe de Corinthe

La difficulté majeure de ce travail était de comparer des sites qui, au premier abord, ne peuvent pas l'être facilement (pas de monuments ou de roches en commun). Pour cela, les observations de terrain (nature des pierres, volume, provenance, utilisation) ont été compilées et traduites en données quantifiées. Cette étape était nécessaire pour observer des tendances ou des exceptions dans l'utilisation des pierres dans la construction monumentale. Plusieurs éléments ont été compilés pour chaque site : le nombre de faciès et le volume mis en œuvre de chaque faciès, au travers de leur nature et de leur origine.

Un total de 36 paramètres de base, en prenant en compte les types de roches définis (6), le nombre et le volume de chaque type (2), en fonction de l'origine (locale, régionale, allochtone) (3), ont permis d'apprécier de façon quantitative les sites archéologiques (« nombre de calcaires durs locaux », « volume de calcaires durs locaux », « nombre de calcaires durs régionaux »... voir en **Annexe B1**). Ces paramètres sont à étudier et combiner pour accéder à des données générales : le nombre total de lithologies par origine et nature, le volume total allochtone, le volume total local, le volume total régional.

Cela a permis de déterminer le nombre moyen de faciès par site et la proportion des faciès en fonction de leur nature et leur origine dans la construction grecque sur le pourtour du Golfe de Corinthe.

2.3.2 Prise en compte de l'environnement et de l'histoire des sites

Cependant, les limites de l'analyse précédente sont vite atteintes : chaque site est étudié hors de son contexte géologique, géographique et historique. Or, de nombreux facteurs peuvent expliquer l'importation et l'utilisation de certains matériaux dans la construction : les ressources en pierre disponibles localement, les accès terrestres et maritimes pour les échanges en particulier.

La prise en compte de l'environnement géologique se fait naturellement par la définition des origines des faciès mis en œuvre (local, régional, allochtone). Cependant, cette méthode ne permet pas de faire la différence entre les faciès présents localement, mais non exploités pour

la construction, et ceux absents localement (donc *de fait* non exploités). Cela nécessite alors une étude cas par cas, en se basant sur les cartes géologiques et le terrain.

Enfin, faire la comparaison entre un sanctuaire panhellénique et un port fortifié par exemple, n'a pas de sens : le premier est un lieu de culte commun à tous les grecs, où des cités et personnages illustres de toute la Méditerranée viennent faire construire des offrandes, et le second est un lieu sans habitants fixes, destinés à la protection. Des études au cas par cas, ou par regroupement de sites similaires, sont nécessaires pour expliquer certaines exceptions ou des biais dans les données.

Il faut cependant garder en tête plusieurs biais. Premièrement, il y a un très clair *biais d'étude* : un site très peu fouillé peut présenter une très faible diversité de faciès, non pas parce que peu de roches ont été employées, mais plutôt car il a été peu étudié. Il y a ensuite des *biais de conservation* : un site dont nous ne conservons que les fondations, car l'élévation a été rasée par exemple, présentera aussi une variété de matériaux plus faible. Ainsi, lors de la présentation des données sur site, l'état de conservation et de fouille sera indiqué.

L'utilisation des pierres peut être étudiée en inventoriant leur utilisation en fonction de la nature de la roche. Pour cela, il faut définir des utilisations : cela est possible sur les sites où nous avons accès aux monuments formellement. Ainsi, cette approche a été réalisée uniquement à Delphes (voir [5.6](#)).

2.4 Analyses pétrographiques et minéralogiques en laboratoire

Lors des prospections des formations géologiques et des carrières anciennes, des blocs de roches ont été prélevés pour des analyses en laboratoire. En fonction de la taille de la carrière, un ou plusieurs échantillons ont été prélevés, soit sur des blocs issus des déchets de taille, soit à l'affleurement, dans la même formation que celle exploitée dans la carrière.

2.4.1 Description macroscopique

Chaque faciès a été décrit macroscopiquement, en utilisant les mêmes critères que les descriptions sur site archéologique (voir [2.2.1](#)). En effet, le principal problème de l'étude des matériaux en archéologie est la comparaison des pierres sur site (observation limitée à l'œil nu) et des pierres en laboratoire (avec microscopie, analyses chimiques et élémentaires). Cela est

dû aux différences d'échelles et de précisions : comment corréler les résultats d'une analyse chimique et élémentaire, à une observation à l'œil nu ?

Ainsi, une description macroscopique précise est fondamentale car elle représentera notre principal argument pour corréler des carrières de pierres à des pierres mises en œuvre, si aucun échantillonnage sur site n'est possible. Des observations au microscope binoculaire ont complété les observations à l'œil nu et à la loupe pour les échantillons géologiques.

2.4.2 Microscopie optique

L'étude des lames minces a été réalisée au microscope optique classique (Lumière Polarisée Analyisée (LPA) et Lumière Polarisée Non Analyisée (LPNA)). Elles ont été produites par E. Delairis, au laboratoire de l'ISTeP. C'est une étape primordiale pour les analyses ultérieures : la description pétrographique fournira la base de données sur les matériaux de construction, et permettra notamment d'établir les principaux critères d'identification.

La description des lames minces est classique :

- les éléments constitutifs (minéraux, fossiles (clastes et entiers) ; taille, forme et répartition, pourcentage de chaque éléments),
- le ciment (sparite ou micrite) ; forme, composition, pourcentage ;
- la porosité (type, forme des pores, pourcentage) :
- les autres figures sédimentaires visibles au microscope (bioturbation, figures de charge,...)

La porosité est particulièrement importante puisqu'elle influe sur de nombreuses propriétés physiques de la roche (voir [1.3.3](#)). Une classification très utilisée est celle de Choquette & Pray (1970), qui différencie la porosité liée à la sédimentation initiale (ou « fabric-selective ») de la porosité secondaire, celle obtenue au cours du temps (**Figure 12**).

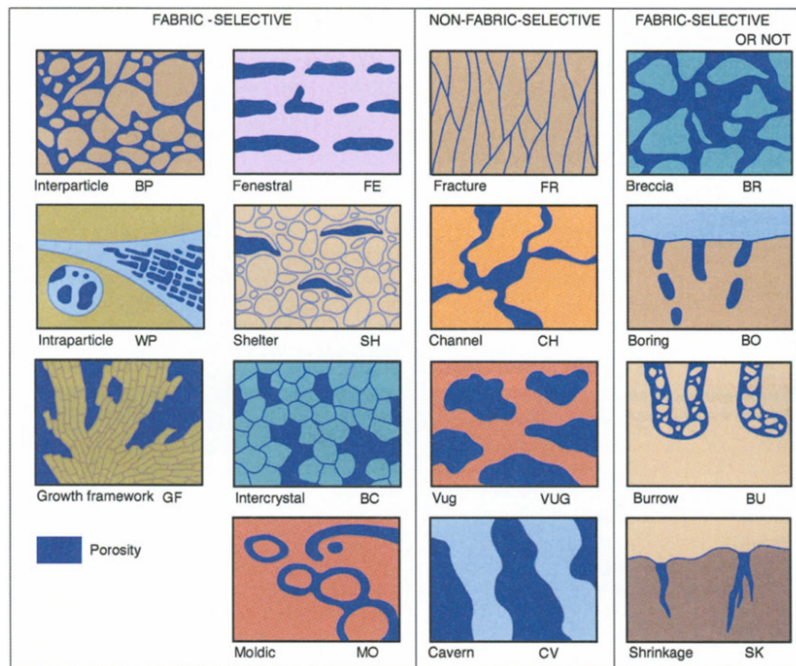


Figure 12. Les différents types de porosité, d'après Choquette et Pray (1970) (dans Flügel, 2004).

2.4.3 Diffractométrie aux Rayons X (DRX)

Pour préciser la composition minéralogique des échantillons et confirmer les observations au microscope optique, des analyses en diffraction des rayons X (DRX) ont été réalisées sur les échantillons des carrières. Le diffractomètre D2 PHASER de la marque Brücker, équipé d'un détecteur LYNXEYE et d'une anode en cuivre ($I_{ka(1;2)} = 1.541838 \text{ \AA}$), disponible à l'ISTeP, a été utilisé.

Les analyses ont été réalisées par diffraction de rayons X en roche totale sur poudre fine non orientée. C'est une méthode couramment utilisée dans la caractérisation des matériaux, rapide (environ 20 minutes d'analyse), nécessitant peu de matière (quelques grammes), qualitative et semi-quantitative (proportion autour de 5% pour celui de l'ISTeP). Cependant, les minéraux très peu présents et les phases amorphes ou peu cristallisées ne sont pas ou difficilement identifiables, et encore moins quantifiables.

Le broyage des échantillons a été réalisé manuellement avec un mortier en agate, jusqu'à obtenir une poudre homogène fine. La poudre est ensuite placée sur une lame en verre amorphe. L'échantillon est installé dans un porte échantillon fixe, où il est bombardé de rayons X par un canon à rayon X se déplaçant dans une gamme 2θ comprise entre 3° et 75° . Ce bombardement

perturbe le nuage électronique des atomes et un rayonnement de même fréquence est réémis. On étudie l'intensité détectée des rayons X diffusés (eV) selon l'angle de déviation du faisceau (2θ) : la courbe obtenue est un diffractogramme. Lorsque certaines conditions sont respectées, on obtient un pic de diffraction : chaque pic d'intensité correspond à un plan cristallographique d'une espèce minérale, et lui est donc caractéristique (**Figure 13**).

L'identification des phases est réalisée en comparant le diffractogramme obtenu avec une base de données, à l'aide du logiciel MacDiff®4.2.5 : chaque espèce minérale possède une fiche de référence présentant les pics de diffraction associés.

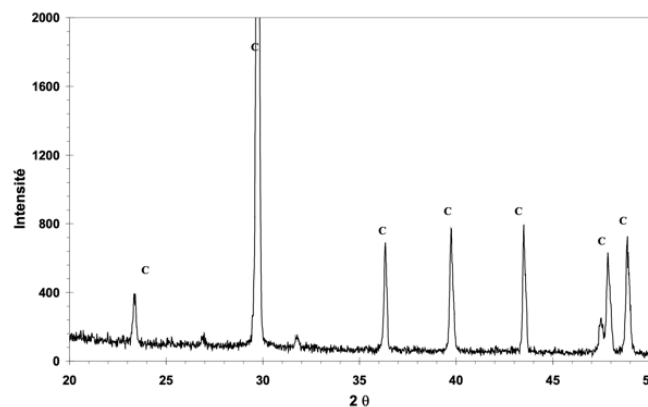


Figure 13. Exemple de spectre DRX : la calcite.

Les pics caractéristiques permettent d'identifier la calcite, en particulier celui à $29,4$ (2θ) qui présente la plus forte intensité.

2.5 Caractérisation physique des pierres

La description pétrographique des roches permet ici de résoudre la question de la provenance. Elle doit être couplée à une caractérisation physique pour comprendre leur utilisation dans les bâtiments. Les principales propriétés qui nous intéressent sont la densité et la porosité, car elles influent directement sur le poids, mais aussi le comportement de la roche face à l'eau (nature du réseau poreux, perméabilité).

2.5.1 Porosimétrie par saturation à l'eau

La porosité d'une roche peut être estimée via la méthode de porosimétrie par saturation à l'eau. Elle permet d'apprécier le volume des pores connectés, c'est-à-dire liés entre eux dans

l'échantillon et qui pourront être remplis par le fluide lors de la saturation, ici l'eau distillée. La porosité totale correspond au pourcentage de vide dans la roche. Ici nous mesurons une porosité partielle, mais qui apporte le plus d'information sur les propriétés intrinsèques de la roche : celle accessible à l'air et à l'eau, et qui aura donc le plus d'influence sur la durabilité de la roche.

Après un passage à l'étuve jusqu'à obtenir une masse constante (m_{sec} en g), les échantillons secs sont dégazés, puis mis dans de l'eau distillée pendant 24h, sous vide (**Figure 14**). Une fois saturés, ils sont sortis et les masses saturées (m_{sat} , en g) et hydrostatiques (m_{hydro} , masse en immersion, en g) sont mesurées.

La porosité connectée de l'eau (ϕ_{H2O} sans unité) se calcule selon la formule suivante :

$$\phi_{H2O} = \frac{(m_{sat} - m_{sec})}{(m_{sat} - m_{hydro})} \times 100$$

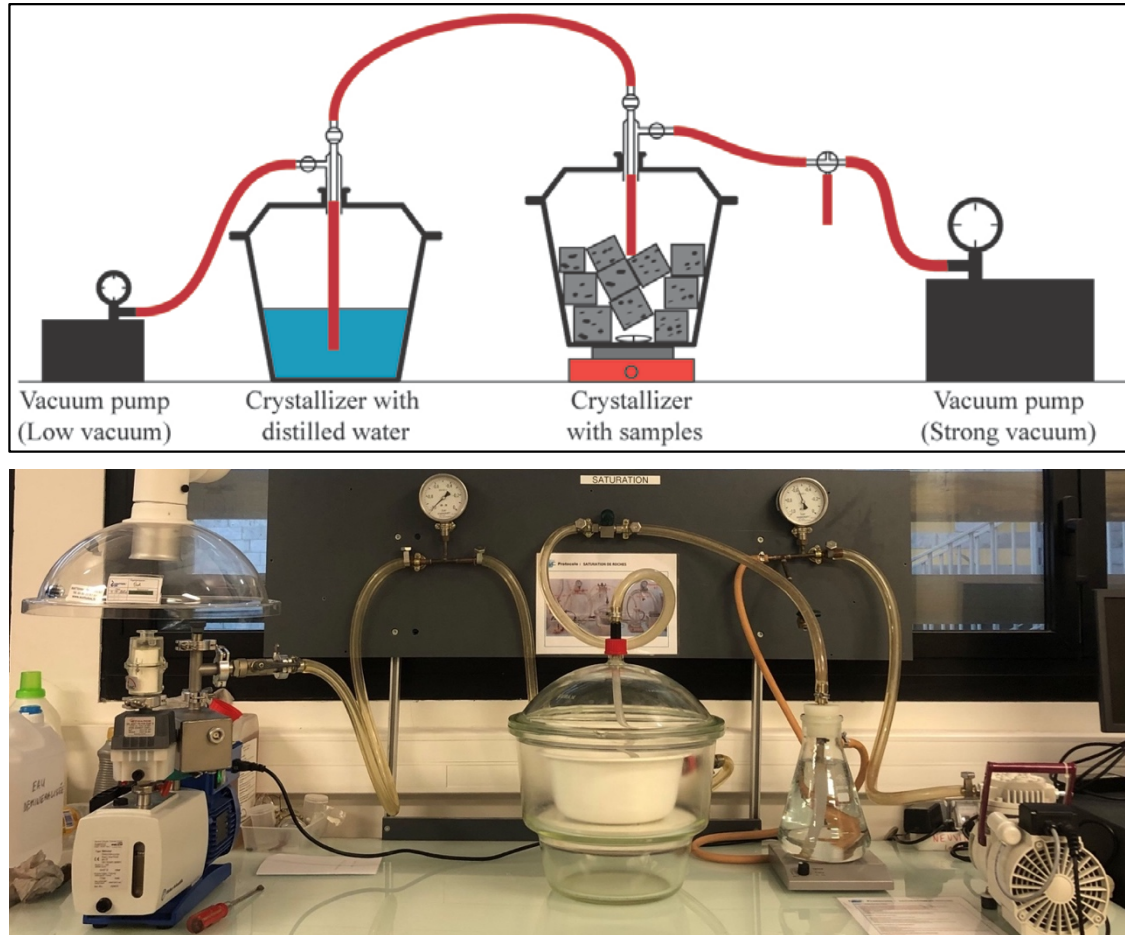


Figure 14. La porosimétrie par saturation à l'eau.
Schéma théorique du dispositif (Navelot 2018) et, en dessous, le montage expérimental disponible à l'université de Cergy Pontoise.

2.5.2 Mesures de densité

La densité d'un matériau correspond au rapport entre la masse volumique ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) et un corps de référence : c'est donc une valeur sans unité. Cependant, on utilise généralement l'eau comme corps de référence ($1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) : la valeur de densité est donc égale à la masse volumique. On a tendance à appeler la masse volumique, la densité : nous ferons cet abus de langage.

La **densité apparente** (d_{ap} en g/cm^3) d'une roche est la densité de matériel dans un volume donné, prenant en compte le volume de vide. Elle dépend de la porosité et de la composition minérale : des variations de densité peuvent traduire des compositions différentes ou la présence de porosité non connectée. La **densité de phase solide** (d_{ps} en g/cm^3) d'une roche ne prend pas en compte la porosité connectée, mais uniquement le squelette de minéraux

avec la porosité non connectée. Ce n'est pas **la densité de phase solide vraie**, qui est la densité de la phase minérale uniquement (**Figure 15**).

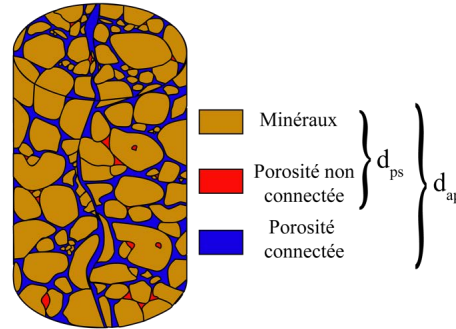


Figure 15. Schéma de la porosité connectée et non connectée (Bertrand, 2017).

La densité de phase solide vraie ne prend en compte que les minéraux, en marron, alors que la densité apparente correspond à la densité dans un volume donné.

Suite aux mesures réalisées pour la porosimétrie par saturation à l'eau, avec la masse sèche (m_{sec} en g), saturée (m_{sat} , en g) et hydrostatique (m_{hydro} , en g), la **densité apparente** (d_{ap} en $g.cm^{-3}$) est calculée selon l'équation suivante :

$$d_{ap} = \frac{m_{sec}}{V_{tot}}$$

$$\text{Avec } V_{tot} = m_{sat} - m_{hydro}$$

Ces données peuvent être complétées avec des mesures au pycnomètre à gaz, pour prendre en compte la porosité non connectée et accéder à la **densité de phase solide**. C'est une méthode peu coûteuse, à réaliser sur échantillon sans forme particulière de maximum 2 cm sur 2 cm, utilisant un gaz inerte pour mesurer la densité de façon précise et automatique avec la méthode de déplacement de gaz. Ici, l'hélium est utilisé car c'est une des plus petites molécules existantes, qui pourra le mieux s'infiltrer dans les pores connectés des échantillons.

Une chambre fermée de volume connu, où l'échantillon est placé, est remplie d'hélium ; une fois l'équilibre atteint, le gaz est déchargé dans une seconde chambre fermée, de volume aussi connu. Les pressions mesurées dans les deux chambres permettent de calculer le volume

de la phase solide (V en cm^3). Avant chaque mesure, l'échantillon a été pesé à sec (m_{sec} en g). L'ensemble des mesures est réalisé à température constante.

La **densité de phase solide** (d_{ps} en g/cm^3) se calcule selon la formule suivante :

$$d_{ps} = \frac{m_{\text{sec}}}{V}$$

2.5.3 Porosimétrie par intrusion au mercure

La porosimétrie par intrusion au mercure donne des informations sur la géométrie des pores : dimensions, distribution des seuils d'accès, morphologie du réseau poreux. Plus compliquée à mettre en œuvre et plus coûteuse, l'analyse est destructive : l'échantillon est contaminé au mercure.

Dans l'air et à température ambiante, le mercure est considéré comme un fluide non mouillant : il ne pénètre pas spontanément dans les pores par capillarité, comme l'eau, avec une majorité des matériaux. Il faut de ce fait appliquer une pression pour faire rentrer le mercure dans le réseau poreux. La pression appliquée (P_c) est reliée au rayon du capillaire par l'équation de (Washburn 1921) :

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{R_c}$$

Avec $\theta = 130^\circ$, l'angle de contact entre le mercure et le solide.

$\sigma = 485.10^{-3}$ N/m, la tension superficielle du mercure.

Le rayon capillaire correspond au rayon de seuil d'accès des pores. Avec cette méthode, les pores atteints vont de $350 \mu\text{m}$ à $0,005 \mu\text{m}$. Les mesures ont été réalisées par Yves Géraud au laboratoire de l'ENSG sur un porosimètre Autopore de Micrometrics. Les échantillons devaient rentrer dans le porte-échantillon d'un volume compris entre 3 et 5 cm^3 . L'analyse se déroule en deux étapes : basse pression (pores entre 350 et $10 \mu\text{m}$) et haute pression (inférieure à $10 \mu\text{m}$). Le changement se fait manuellement, ce qui laisse un artefact (palier vers $10 \mu\text{m}$ sur la courbe de porosité cumulée). Ensuite, une dernière phase a lieu avec une extraction et intrusion rapide du mercure à haute pression.

Les résultats obtenus peuvent être représentés dans un graphique, avec en fonction du diamètre des pores en μm , deux courbes (**Figure 16**) : la porosité incrémentale (% , volume par palier, qui permet de voir la distribution des seuils et leur contrôle sur la porosité) et la porosité cumulée (% , correspond à la porosité connectée). La forme des courbes nous informe sur le réseau poreux : s'il existe une seule classe de pores (réseau unimodal) ou plusieurs (réseau bimodal, voir hétérogène). La courbe en pointillée correspond à la phase d'extraction et d'intrusion et nous renseigne sur la géométrie des pores par rapport au seuil d'accès.

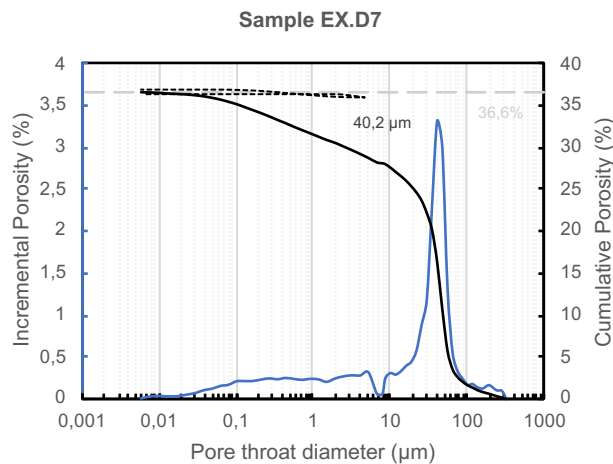


Figure 16. Exemple de résultat obtenu par porosimétrie au mercure.
Réalisé sur l'échantillon EX.D7 : la courbe bleue représente la porosité incrémentale, la courbe noire, la porosité cumulée ; et la courbe noire pointillée, la phase d'extraction et d'intrusion.

2.5.4 Imbibition capillaire

Les mesures de cinétique d'imbibition nous informent sur le type de réseau poreux et le comportement des roches face aux remontées capillaires par exemple. Les courbes d'imbibition capillaire de différents matériaux peuvent être obtenues expérimentalement de façon assez simple et peu coûteuse. La méthode consiste à déposer les échantillons sur une surface dans un bac rempli d'eau, de façon à ce que la base de l'échantillon (une surface plane) soit en contact avec l'eau (**Figure 17**). Les échantillons ont été séchés en étuve préalablement jusqu'à masse constante, et le bac est fermé pour avoir un degré hygrométrique constant proche de 100% et éviter les phénomènes d'évaporation. L'eau dans le bac doit être tenue à hauteur constante, et l'expérience doit avoir lieu à température constante.

Les échantillons vont ensuite progressivement s'imbiber. A intervalle de temps progressif, l'avancée de la frange est mesurée (en centimètre) ainsi que le poids de l'échantillon (prise d'eau, en gramme). Ces mesures, en fonction du temps, permettent de tracer les courbes caractérisant la cinétique d'imbibition des différents matériaux, et dont l'allure donne des informations sur le type de réseau poreux de chaque échantillon.

Pour les échantillons cylindriques, avec le rayon de l'échantillon (**R** en cm) et le coefficient directeur de la courbe corrigée ($dm/d\sqrt{t}$), on peut calculer le coefficient de capillarité (**C** en $g.cm^{-2}.s^{-1/2}$) :

$$C = \frac{1}{\pi \times R^2} \times \frac{dm}{d\sqrt{t}}$$

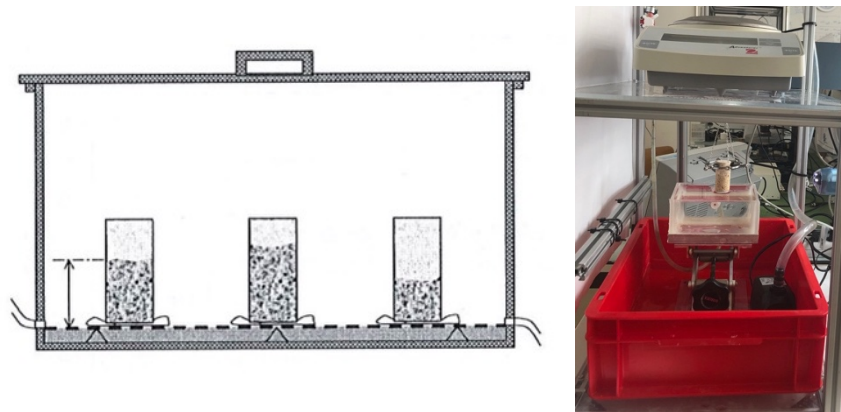


Figure 17. Dispositif de mesure de l'imbibition capillaire.
 À gauche, schéma théorique (Rousset-Tournier 2001) ; à droite, montage expérimental disponible à l'université de Cergy.

2.6 Analyses mécaniques

Enfin, après la description pétrographique et la mesure des propriétés physiques des pierres (densité, porosité, capillarité), une dernière propriété physique est étudiée : le comportement des matériaux face à une contrainte physique (la pression, l'extension ou la

traction, la ténacité ou la propagation d'une fissure). Si les valeurs numériques ne sont pas ici d'une importance fondamentale, le but est de comprendre le comportement des matériaux par extrapolation aux pressions qu'ils subissent lors la mise en œuvre.

2.6.1 Mesures acoustiques

Les propriétés acoustiques d'une roche permettent d'approcher les propriétés géomécaniques du matériau de façon non destructive : les échantillons doivent cependant présenter deux faces planes et parallèles. Les variations de vitesse de propagation de deux types d'ondes sont mesurées : les ondes P (primaires) et les ondes S (secondaires). Les ondes P correspondent à un mouvement de compression : les roches sont comprimées puis détendues comme un ressort, la vibration se fait selon l'axe de propagation. Ce sont les plus rapides et elles traversent tous les matériaux. Les ondes S correspondent à un mouvement de cisaillement, les matériaux sont déformés perpendiculairement à la propagation de l'onde ; elles sont plus lentes, avec une amplitude et une période plus grande, et ne traversent que les solides, par opposition aux liquides. Les mesures sont réalisées avec un générateur d'impulsion, couplé à deux transducteurs piézo-électriques, posés sur les deux faces parallèles de l'échantillon (**Figure 18**). Les données sont enregistrées à un intervalle régulier défini préalablement.

Grâce aux vitesses de propagation des ondes (V_p et V_s en $m.s^{-1}$) et la densité des échantillons (d en $kg.m^{-3}$), on peut calculer les modules élastiques dynamiques (de compressibilité K et d'élasticité μ), le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν . Respectivement, ils permettent d'appréhender l'élasticité du matériau, et de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de la contrainte appliquée (Schön 2015). Les mesures sont réalisées sur échantillons secs et saturés.

Le module d'élasticité (μ en **GPa**) se calcule selon la formule suivante :

$$\mu = (\rho \times V_s^2) \times 10^{-8}$$

Le module de compressibilité (K en **GPa**) se calcule selon la formule suivante :

$$K = (\rho \times V_p^2 - \frac{4}{3}\mu) \times 10^{-8}$$

Le module d'Young (E en **GPa**) se calcule selon la formule suivante :

$$E = \frac{9 \times K \times \mu}{(3 \times K) + \mu}$$

Le coefficient de Poisson (ν sans unité) se calcule selon la formule suivante :

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \times \left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)}$$



Figure 18. Mesures des ondes acoustiques.

Montage expérimental au LGE de l'Université de Cergy-Pontoise pour les mesures des ondes V_p et V_s sur un échantillon cylindrique.

2.6.2 Résistance à la propagation d'une fissure : essai SCB

La ténacité d'un matériau est sa capacité à résister à la propagation d'une fissure : il peut être intéressant dans l'optique de comprendre l'extraction de la roche. Cependant, nous avons peu d'échantillon pour réaliser ses essais. La ténacité peut être approchée avec un essai SCB, « semi-circular bending test », avec trois points de flexion. Ce test n'est pas compliqué à mettre en œuvre, mais dépend beaucoup de la découpe des échantillons selon des mesures standardisées (**Figure 19**, A). Le demi-cercle fendu est ensuite positionné dans une presse à compression uniaxiale. La presse GDS VIS du laboratoire LGE de Cergy-Pontoise a été utilisée pour les mesures (rampe de 0,2 kN par minute). Sur un graphique représentant le déplacement (et donc le temps) et la force soumise par la presse, on lit la force maximale soumise à

l'échantillon (P_{max} en kN) avant fracturation. Les mesures sont réalisées sur échantillons secs et saturés.

Avec les dimensions a (hauteur de la fente), R (rayon du cylindre) et B (épaisseur du cylindre) en mètres, la ténacité (K en $\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$) peut être calculée selon la formule suivante :

$$K_{SCB} = \frac{P_{max}\sqrt{\pi a}}{2RB} \times Y'$$

Avec

$$Y' = -1,297 + 9,516\left(\frac{s}{2R}\right) - (0,47 + 16,457\left(\frac{s}{2R}\right))B + (1,071 + 34,401\left(\frac{s}{2R}\right))B^2$$

$B = a/R$ compris entre 0,4 et 0,6.

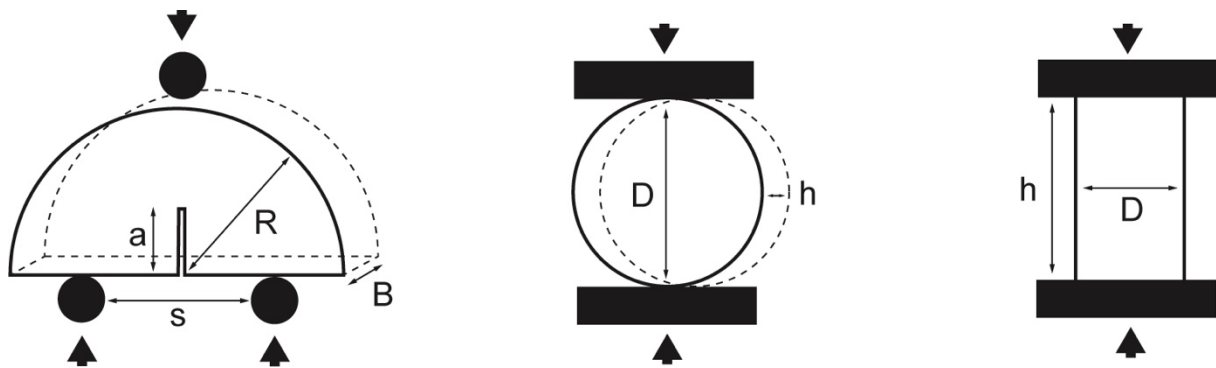


Figure 19. Schéma des échantillons nécessaires pour les essais mécaniques.

A : demi-cylindre fendu pour les essais de ténacité. B : cylindre court pour des essais brésiliens (résistance à la traction). C : cylindre long pour des essais de compression uniaxiale.

2.6.3 Résistance à l'extension : essai brésilien

La résistance à l'extension peut se mesurer grâce à l'essai brésilien, aussi appelé essai de fendage. C'est la méthode la plus facile à mettre en œuvre et les échantillons sont plus petits : plus de mesures sont possibles. Cette méthode consiste à fendre un cylindre de hauteur (h en m) et de diamètre (D en m) dans une presse à compression uniaxiale (**Figure 19**, B). La presse GDS VIS du laboratoire LGE de Cergy-Pontoise a été utilisée pour les mesures (rampe de 0,2 kN par minute). Sur un graphique représentant le déplacement (et donc le temps) et la force soumise par la presse, on lit la force maximale soumise à l'échantillon (F_{max} en kN) avant fendage. Les mesures sont réalisées sur échantillons secs et saturés.

La résistance à l'extension (σ_{ext} en MPa) peut être calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_{ext} = \frac{2 \times F_{max}}{\pi \times h \times D} \times 10^{-2}$$

2.6.4 Résistance à la compression : essai UCS

La résistance à la compression d'une roche peut se mesurer de façon destructive avec des procédures normalisées comme le test UCS (*Uniaxial Compressive Strength*). Le rapport hauteur sur diamètre des échantillons cylindriques est de 2 à 2,5 : ici, des cylindres de 2,5 cm de diamètre sur 5 de hauteur ont été utilisés (**Figure 19**, C). Les manipulations sont simples mais longues, couteuses et très dépendantes de la qualité de découpe des échantillons (parallélisme des faces du cylindre), d'où l'utilisation de mesures indirectes, comme les mesures acoustiques.

Une presse uniaxiale sans confinement permet de mesurer la résistance à la compression simple. Les échantillons cylindriques rigides sont mis sous presse, jusqu'à fissuration. Sur un graphique représentant le déplacement (et donc le temps) et la force soumise par la presse, on lit la force maximale (F_{max} en kN) avant fendage. La presse GDS VIS du laboratoire LGE de Cergy-Pontoise a été utilisée pour les mesures (rampe de 0,2 kN par minute ou une vitesse de 0,012 mm/min en fonction du type d'échantillon).

La résistance à la compression (σ_{comp} en MPa) se calcule selon la formule suivante, avec d en mètres :

$$\sigma_{comp} = \frac{F_{max}}{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2} \times 10^2$$

En plus de la résistance maximale de la roche, cet essai permet d'observer la déformation ductile avant la rupture si elle a lieu : effritement, gonflement, propagation des fissures, pertes de matière... qui peuvent nous aider à caractériser la roche en tant que matériau de construction. On peut aussi calculer le module d'Young ou d'élasticité statique E_{stat} , qui doit être similaire au module d'Young dynamique (mesuré par acoustique, voir au-dessus en [2.6.1](#)).

2.7 Synthèse

Un tableau récapitulatif des différentes analyses réalisées est présenté ci-dessous (**Tableau 1**). Il est indiqué le type d'informations extraites, la forme et la taille de l'échantillon nécessaires pour l'analyse, la durée moyenne de l'analyse (si pertinent, entre la préparation de l'échantillon et/ou les analyses par la machine), si l'analyse est destructive ou non. Cela permet de mettre en exergue les principaux avantages et inconvénients de chaque approche et de choisir la plus adaptée en fonction des problématiques.

Analyse	Informations obtenues	Échantillon	Durée / préparation	Destructif
Microscope binoculaire / loupe	Caractères macro : taille et forme de grains, structure de la roche	Informe	Pas de préparation, 10 à 30 minutes	Non
Lame mince	Minéralogie, texture, type de porosité	Sucre de pierre de 1 x 4 x 2 cm environ	2 jours complets par un professionnel (30 - 60 € / lame)	Oui
DRX	Minéralogie, qualitatif et semi-quantitatif	Quelques grammes, en poudre	En fonction du mode, 30 min à quelques heures	Oui
Porosimétrie par saturation à l'eau	Porosité (%), densité totale et densité de phase solide	Forme géométrique recommandée (cylindre), ou informe	48h	Oui mais réutilisable
Porosimétrie au mercure	Porosité au mercure (%), densité totale et de phase solide, forme du réseau poreux	Entre 5 cm ³ et 2 cm ³	En fonction du mode, 30 min à ½ journée	Oui
Imbibition	Coefficient de capillarité, forme du réseau poreux	Au moins 5 cm de haut, une face plane	En fonction de la roche, 30 min à 2-3 h	Oui mais réutilisable
Perméamètre au gaz	Perméabilité	Cylindre de 5 cm x 2,5 cm	30 min – 1h en fonction de la roche	Oui
Mesures acoustiques	Propriétés mécaniques : E, u, coefficient de poisson	Deux faces parallèles	Rapide, 10 minutes par échantillon	Non (mais découpe)
Essai SCB	Résistance à la tension (propagation d'une fissure)	Demi-cylindre de 5 x 2,5, avec fente	15 à 30 min - découpe compliquée	Oui
Essai brésilien	Résistance à la traction	Cylindre de 1,25 x 2,5 (rapport de 2)	15 à 30 min - Découpe compliquée	Oui
Essai UCS	Résistance à la compression	Cylindre de 5 x 2,5 (rapport de 2)	15 à 30 min - découpe compliquée	Oui

Tableau 1. Synthèse des méthodologies appliquées dans le cadre de l'étude des pierres calcaires utilisés dans la construction.

3 La pierre dans la construction

Sommaire

[3.1 Introduction](#)

[3.2 La région du Golfe de Lechaion \(article\)](#)

[3.3 Utilisation des pierres dans un sanctuaire panhellénique : Delphes \(article\)](#)

[3.4 Le nord-est du Golfe : la Mégaride et la Béotie](#)

[3.4.1 Contexte historique et topographique](#)

[3.4.2 Description des roches mises en œuvre](#)

[Pagai](#) – [Aigosthènes](#) – [Éleuthères](#) – [Mazi](#) – [Platéas](#) – [Kreusis](#) – [Siphai](#) – [Mavrovouni](#) – [Thisbé](#) – [Chorsiai](#) – [Thèbes](#) – [Kabirion de Thèbes](#) – [Akraiphia](#) – [Ptoion](#) – [Val des Muses](#) – [Aliarte](#) – [Orchoménos](#) – [Livadia](#)

[3.5 Le sud et l'ouest du Golfe](#)

[3.5.1 Contexte topographique](#)

[3.5.2 Description des roches mises en œuvre](#)

[Corinthe](#) – [Sicyone](#) – [Perachora](#) – [Isthmia](#) – [Kléonai](#) – [Némée](#) – [Phlious](#) – [Stymphale](#) – [Phénéos](#) – [Argos](#) – [Héraion d'Argos](#) – [Épidaure](#) – [Trézène](#) – [Kalaurie](#) – [Kalydon](#) – [Pleuron](#) – [Élis](#) – [Olympie](#)

[3.6 Synthèse](#)

3.1 Introduction

Cette partie a pour but de présenter les roches mises en œuvre dans **37 sites archéologiques autour du Golfe de Corinthe (Figure 3)**. Les données sont les résultats de 4 missions de terrain réalisées entre octobre 2019 et octobre 2021. Les données présentées dans les quatre sous-chapitres suivants sont synthétisées en [3.6](#). Les deux premiers correspondent à deux publications réalisées en 2020 et 2022, et les deux suivants présentent des résultats non publiés, par région.

Chaque site sera présenté, selon la même organisation :

- Type de vestige : les objets étudiés et leurs datations sont présentés succinctement : murs d'enceinte, tours, sanctuaires avec temple, trésors, théâtres... Ainsi que les vestiges non observés, et l'état de conservation du site quand cela est pertinent.
- État des fouilles / études : les références ici ne sont pas présentées pour réaliser une synthèse exhaustive, mais pour indiquer les principales sources utilisées pour les données architecturales. Cela permet, avec le type de vestige, d'évaluer les biais d'étude (voir [2.3.3](#)).

- Nombre de faciès employés : le nombre de faciès en place (faciès associés à des blocs mis en œuvre), de faciès non en place (faciès associés à des blocs errants, mais rattachés à un monument), de faciès isolés (faciès associés à des blocs errants, mais non rattachés à une structure) et ceux identifiés dans la littérature seulement (non observés sur le site). Les marbres, même employés en sculpture, sont mentionnés, mais considérés comme allochtones par défaut.
- Description des faciès : les faciès sont décrits systématiquement selon les mêmes critères. L'origine est établie ou hypothétique, parfois purement spéculative (indiquée par un (?), signifiant que l'on se base uniquement sur la bibliographie géologique). Souvent, les faciès d'origine inconnue sont considérés comme locaux si le contexte géologique le permet ; sinon, ils sont considérés comme régionaux. Les faciès sont classés par type selon la classification définie préalablement (voir [2.2.1](#)).
- Utilisation : pour chaque faciès, le volume de pierre qu'il représente dans la construction du site est estimé. Un volume symbolique de 1% est attribué aux faciès non en place et utilisés dans une trop faible quantité ou non associés à une structure connue. Les sites indiqués avec une astérisque (*) n'ont pas pu faire l'objet d'une estimation des volumes : les raisons seront expliquées dans la description.
- Carrières associées : en se basant sur nos observations, le contexte géologique ou la littérature, et indiquant les carrières décrites dans la partie suivante (voir [4.2](#)). La différence est faite entre les carrières clairement identifiées (délimitées dans l'espace) et les traces d'extractions sur place (liées à du terrassement par exemple), et si elles ont fait l'objet d'une prospection ou non (« non recherchée »).

3.2 La région du Golfe de Lechaion (article)

Les résultats pour la région sud-est du Golfe de Corinthe ont été publiés dans les Comptes Rendus Géosciences en 2022 (de Vals & Moretti 2022).

Le but de cette étude était de montrer comment les constructeurs grecs de l'Antiquité ont exploité leur environnement pour construire quatre sites majeurs dans la région : la Cité-État de l'ancienne Corinthe, le sanctuaire de Poséidon à Isthmia, l'Ancienne Sicyone et le sanctuaire d'Héra à Perachora. Au travers d'une synthèse de leur contexte géologique respectif, de leur position dans la topographie, des ressources disponibles et des matériaux mis en œuvre, nous avons pu identifier plusieurs motifs récurrents dans l'utilisation des pierres. Les ressources

locales sont privilégiées dans le but de réduire les coûts, en particulier si des faciès de faible densité sont disponibles : les formations quaternaires syn-rift du Golfe (calcarénites, calcaires oolithiques, grès, stromatolithes et conglomérats) ont été exploitées plutôt que les dépôts anté-rift. Dans la construction publique, on observe une faible diversité des roches locales, mais elles représentent plus de 90% du volume mis en œuvre. Cependant, nous avons observé des importations de calcaires légers spécifiquement pour les constructions religieuses, alors que les roches dures, et même le marbre, ne semblent pas avoir été attractifs sur ces sites étudiés.



Original Article — Stratigraphy, Sedimentology

Geology and construction: survey of archaeological sites and their natural environments (Gulf of Corinth, Greece)

Marilou de Vals^{®*},^a and Isabelle Moretti[®] ^{a, b}

^a Sorbonne Université, CNRS-INSU, IStEP, UMR 7193, 75005 Paris, France

^b Académie des Technologies, Paris, France

E-mails: marilou.de_vals@sorbonne-universite.fr (M. de Vals),

isabelle.moretti@sorbonne-universite.fr (I. Moretti)

Abstract. This study attempts to demonstrate how Greek builders exploited their geological environment during the Archaic to Hellenistic periods. Four major sites in the eastern part of the Gulf of Corinth are compared: the old city of Corinth, the sanctuary of Poseidon at Isthmia, ancient Sikyon and the Heraeum at Perachora. Ancient builders utilised primary topographic features and natural resources to their advantage, thus reducing costs. They preferred local low-density stones sourced from the more recent Corinth syn-rift deposits (calcareenite, oolitic grainstone, sandstones, stromatolites and conglomerates), rather than the pre-rift Mesozoic carbonates. These local stones represent more than 90% of the volume employed for public construction. Greek builders also imported allochthonous high-porosity limestones for their temples. Hard stones, such as marbles, do not appear to have been attractive to ancient builders at any of the studied sites.

Keywords. Gulf of Corinth, Building materials, Old Corinth, Sikyon, Geoarchaeology.

Manuscript received 14th May 2021, revised 26th October 2021, accepted 17th November 2021.

1. Introduction

1.1. Study context

The study of archaeological sites in their geological context is important to understand their urban development. Water sources are considered the primary limiting factor in the founding of cities [Crouch, 2004, 1993], alongside agricultural potential and strategic positioning for defence, access and trade,

rather than stone resources. However, local geology has inherent consequences for the raw materials available for construction throughout the history of a site. High-quality building stone can be regarded as a valuable factor essential for proper urban development and could have dictated the choices made by ancient builders: the need to import specific stones, the position of an edifice relative to the topography and the adaptation of construction and architecture to the specific properties of local stone. In fact, it has been observed that building material diversity captures geological resource diversity, and

* Corresponding author.

monument studies have shown regional trends in Greek architecture [Martin, 1965].

Typically, geological investigations focus only on building materials inside archaeological sites, as seen at Delphi [de Vals et al., 2020], Epidauros [Varti-Matarangas and Matarangas, 2000] and Malia [Dimou et al., 2000]. Accordingly, few studies have been published regarding building material origins in relation to local geology; this has resulted in the lack of a comprehensive understanding of stone trades and uses, with the exception of the marble trade [Al-Bashaireh, 2021, and references within]. Provenance studies tend to focus on allochthonous rocks but ignore local stones, yet local stones seem to represent the vast majority of stones employed in masonry. However, each site has a unique history and geological setting: accordingly, the main difficulty is in obtaining general patterns or overall trends, if they exist. In this study, we selected four sites within the same geological setting to allow comparative study. Our goal was to quantify stone diversity in archaeological buildings. Accordingly, this is not a detailed report of stone mechanical behaviour and construction techniques, although this topic would be suitable for further study.

Four major archaeological sites are located in the south-eastern part of the Gulf of Corinth: the Heraeum at Perachora, the sanctuary of Poseidon at Isthmia, the old city of Corinth and ancient Sikyon. The last three lie south of the Corinth Canal, whereas the Heraeum lies at the tip of the Perachora Peninsula. Sikyon, Corinth and the Heraeum open into the Gulf of Lechaion, whereas Isthmia opens into the Saronic Gulf (Figure 1). Sikyon is an independent city-state, but whether the sanctuaries of Perachora and Isthmia are part of the territory of the Corinth city-state remains the subject of debate [Wiseman, 1978].

The study focusses on Archaic to Hellenistic ashlar masonry—finely dressed cut stones, as opposed to rubble masonry, between the 7th and the 1st centuries BC. We exclude sculptures and other building materials such as wood or tile. Marbles are used for construction if available locally in large quantities, for example in the Cycladic islands or in Attica [Martin, 1965], but they do not crop out in the Corinth area. Here, they will be referred to as allochthonous stones and their provenance will not be discussed, because it is a complex issue [Vettor et al.,

2021]: macroscopic descriptions are not sufficient to differentiate white marbles and thorough analyses with destructive sampling techniques are required. We will focus on limestones, specifically on the facies called “*pôros*” in modern literature, a term that we will not use because of its lack of geological meaning. For dates, we have adopted the conventional nomenclature BC (Before Christ) and AD (Anno Domini).

In this paper, stone provenance will be addressed using three specific terms: local, regional and allochthonous. “Local” lithologies are those found within the archaeological site or in its close vicinity, usually less than 1 km away. Local stones would have been produced primarily by earthworks, employed directly for construction, and thus did not require transportation. Stones are termed “regional” when they have been sourced from a broader area, from a few kilometres to several dozens of kilometres, which suggests precise selection criteria (prestige, quality of stones and other criteria yet to be defined). Stones are termed “allochthonous” when they have been quarried from facies at considerable distance from the site: up to hundreds of kilometres and, in our case, outside the Gulf of Corinth. Our provenance label is thus linked to the city where the stone was used: the Corinthian oolitic grainstone is considered a regional stone in Sikyon, but a local stone in Corinth.

Finally, the history of each site goes back to Mycenaean times at least, as indicated by antique literary sources. This study focuses on the Archaic to Hellenistic period, when the city-state model was mature: our goal is to explore the link between geology and construction during this period, from a materials perspective. We summed up geological observations inside and outside the archaeological sites and examined the integration of the sites with local topography. This background work will allow us to identify possible recurrent patterns in building materials and bring a new perspective on ancient Greek construction.

1.2. Geological setting

The Gulf of Corinth is a late Miocene–Quaternary rift that separates the Peloponnese from Central Greece and results from the migration of the eastern Mediterranean subduction zone and the propagation of the North Anatolian Fault (NAF) [Armijo et al., 1996, Le Pichon and Angelier, 1979, Moretti et al.,

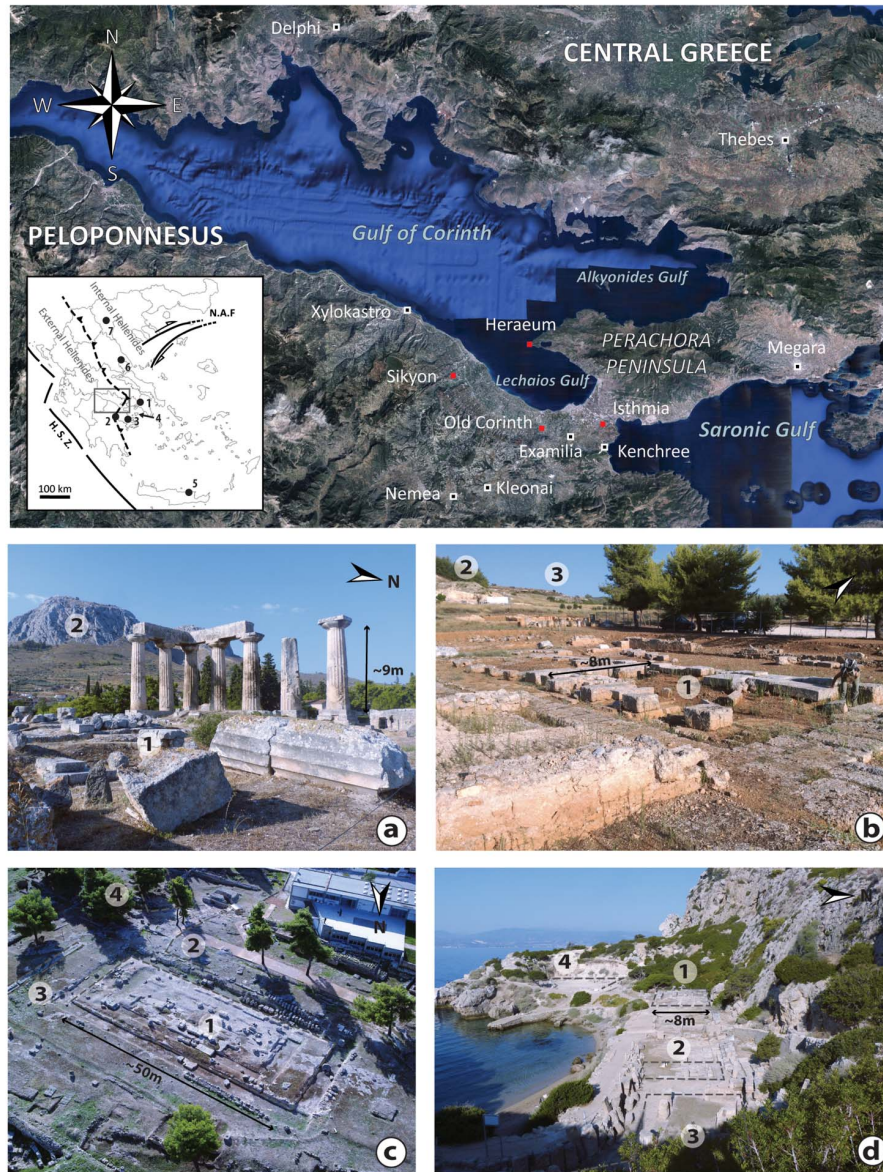


Figure 1. Geographical map of Gulf of Corinth with the main localities mentioned in the text, and the four studied sites in red. The small box shows the main tectonic features of the Hellenides chain: HSZ (Hellenic Subduction Zone), NAF (North Anatolian Fault); the Internal and External Hellenides are separated by a main thrust. The cities and their regions mentioned in the text: (1) Athens in Attica; (2) Argos and (3) Epidaurus in Argolis; (4) Aegina Island; (5) Malia in Crete; (6) Volos in Thessaly; (7) Asomata in Central Macedonia. Pictures of the archaeological sites in Corinthia: (a) The old city of Corinth, view of the Temple of Apollo (1) and the Acrocorinth (2). (b) Ancient Sikyon, view of the temple (1), the theatre (2) and the stadium (3) in the background. (c) Sanctuary of Poseidon at Isthmia, aerial view of the temple (1) with the temenos (2), the altar (3) and the old stadium (4). (d) Eastern part of the Heraeum at Perachora with the Temple of Hera Akraia (1), the altar (2), the stoa (3) and the West Court (4). All pictures belong to the authors except c, taken from the Corinth Museum Website (2021).

2003, Papanikolaou and Royden, 2007] (Figure 1). The rift trends roughly E–W with a N–S opening, and cuts the formal Hellenides thrust, which is separated into the Internal and External Hellenides and oriented ca. N160. The rift is bounded by numerous normal faults cutting through the mainly Mesozoic carbonate basement and the first syn-rift deposits.

The Peloponnesus, and so the southern rift margin, has been subject to uplift since 1 Ma, whereas the northern margin has been sinking [Bell et al., 2009, Collier et al., 1992, Moretti et al., 2003, Rohais and Moretti, 2017]. The eastern part, in the Isthmus region, is cut by major normal faults: the South Alkyonides Fault System (SAFS), the Loutraki Fault (LF) to the north and the Kenchreai Fault (KF) to the south [Papanikolaou et al., 2015] (Figure 2).

The global uplift of the Peloponnesus and the Isthmus has led to the exposure of complex syn-rift sedimentary units. These units record all water-level variations in the history of the Gulf of Corinth and are divided into three groups based on the syn-rift deposit classification [Rohais and Moretti, 2017, and references within]: the Lower Group (5.3–3.0 Ma), Middle Group (3.0–0.8 Ma) and Upper Group (<0.8 Ma) (Figure 2). The Gulf was a set of lakes at the initiation of rifting, with mainly lacustrine and alluvial deposits at the base of the syn-rift series. The Middle Group deposits indicate a deepening of the depositional environment, with Gilbert-type fan deltas, distal turbidites and the deep marine facies further east. The Upper Group represents a major marine regression.

Two Upper Group formations are of particular interest here: a stepped marine terrace system in the region of Corinth up to Xylokastro, and beach-to-shoreface sequences cut by a horst-and-graben system in the Isthmus area [Armijo et al., 1996, Collier, 1990, 1988, Collier and Thompson, 1991, Papanikolaou et al., 2015, Sébrier, 1977, von Freyberg, 1973]. The Perachora Peninsula also underwent regional uplift through the tectonic activity of the SAFS, leading to the formation of Pleistocene marine-shoreline deposits [Andrews et al., 2007, Dia et al., 1997, Leeder et al., 2008, 2005, Robertson et al., 2020] (Figure 2).

Each marine terrace is attributed to a Pleistocene sea-level highstand [Armijo et al., 1996, Imbrie et al., 1984]: six terraces in the Corinth area, splitting into

eight terraces around Sikyon and ten further west, have been documented [Armijo et al., 1996, Dufaure and Zamanis, 1979, Sébrier, 1977]. The Laliotis (T2) and Sataka (T5) terraces are missing at Old Corinth, and younger terraces are more extensive north of Sikyon, near Xylokastro (up to ten). The Temple (T3) and Old Corinth (T4) terraces are the largest and most continuous: they can be followed from Corinth to Sikyon (Figure 2). This configuration gives the region the appearance of a large, flat amphitheatre, with a slight slope northward, incised by river valleys and opening up to the Gulf of Lechaïos.

The terraces are composed primarily of conglomerates that unconformably overlie the “Corinthian Marls” [von Freyberg, 1973], which correspond to turbidites of the Lower and/or Middle Group, the latter of which is missing in the Isthmus area. However, the term “Corinthian marl” is often used without absolute dating in the literature and refers to unconsolidated units underlying the hard terraces. Over the Temple Terrace (T3) and the Isthmia sediment infill, oolitic tidal shoal formations, transverse dunes and longitudinal dunes are also present; the one near Examilia has been dated at 0.2 Ma and was quarried extensively in antiquity [Collier, 1990, Collier et al., 1992] (Figure 2).

The terrace system does not extend to the Isthmus plateau, but the transition to other systems is unclear: the formations south of Loutraki could be linked to the New Corinth Terrace (6) [Collier and Dart, 1991]. The Upper Group is composed of six transgressive–regressive cycles with erosive bases, defined onshore through the Corinth Canal and offshore thanks to recent core samplings [Collier, 1990, Lykousis et al., 2007]. The Isthmia Graben is bounded by the Kalamaki–Isthmia Fault (KIF) to the north and by the Tamaris Fault (TF) to the south [Collier and Dart, 1991, Papanikolaou et al., 2015].

The Holocene to Quaternary uplift of the Perachora Peninsula exposed marine–shoreline deposits. These are characterised by large microbial bioherms on the northwest shoreline of the peninsula’s tip [Kershaw and Guo, 2006, 2003, Portman et al., 2005].

2. Materials and methods

2.1. Site selection

The site selection was based on historical, material and geological factors.

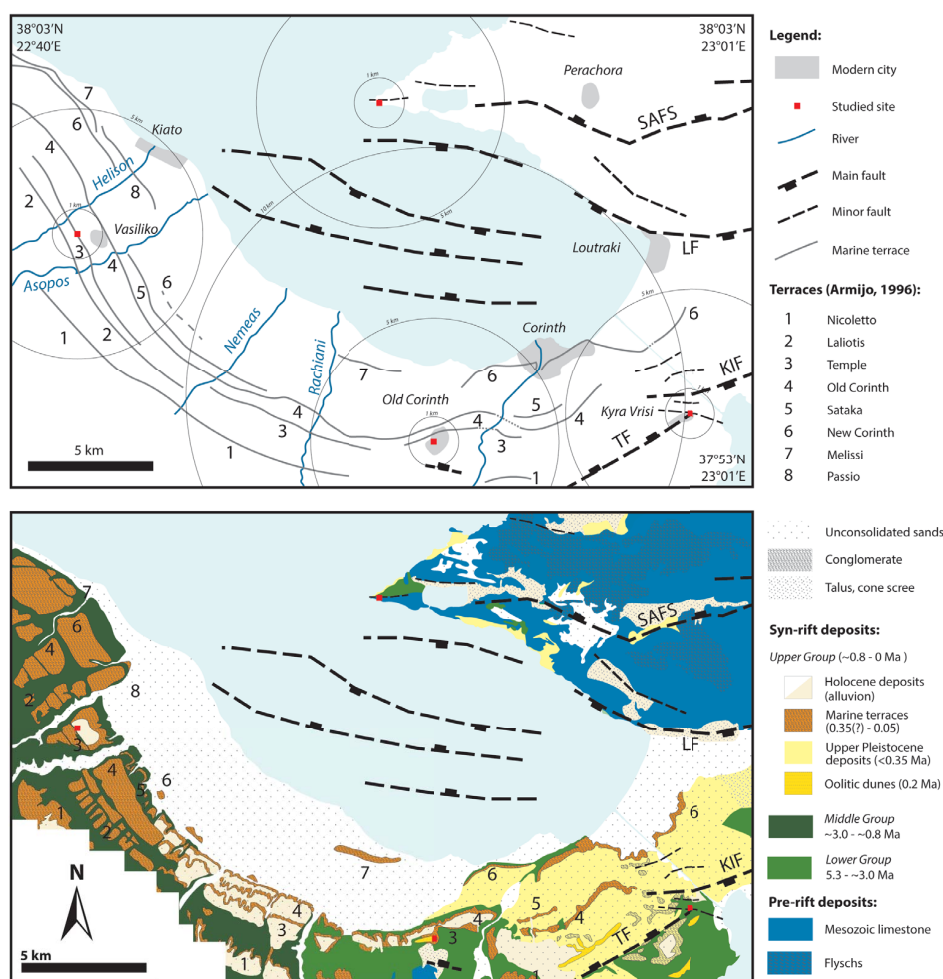


Figure 2. Topographic, structural and geological maps of the studied area, the south-eastern part of the Gulf of Corinth [compiled and modified from the IGME geological maps; Armijo et al., 1996, Collier et al., 1990, Collier and Thompson, 1991, Keraudren and Sorel, 1987, Papanikolaou et al., 2015, Rohais and Moretti, 2017, Sébrier, 1977, von Freyberg, 1973]. KIF: Kalamaki–Isthmia Fault; TF: Tamaris Fault; LF: Loutraki Fault; SAFS: South Alkyonides Fault System.

All four sites were active from the Archaic to Hellenistic periods. We excluded the pre-Archaic and Roman periods because of major differences in construction techniques and materials. It seems that wood prevailed before the 7th century BC, and the Romans used different building materials, mainly bricks and a large variety of stones from the Mediterranean Sea [Martin, 1965, Orlandos, 1968]. The Corinthian area had also undergone pronounced

urban development by the end of the 7th century, with city wall construction in Corinth and temple construction in Corinth, Isthmia and perhaps Perachora [Wiseman, 1978]. Thus, ashlar masonry is particularly relevant in the time span chosen. Furthermore, quarrying techniques did not change significantly over the time period considered here; the Corinthian region is well known for its building material industry, including stones, and many quarry

centres have been identified [Fant, 2009, Hayward, 2003, Wiseman, 1978].

Three of the sites include all the public buildings that are considered to characterise a city: a stoa (a portico), a theatre, a stadium, at least one temple and enough remains conserved for the study to be relevant. We focused on these monuments because houses and common buildings were built with wood and rubble. Previous authors have observed that stones were restricted to large public infrastructure and suggested that allochthonous facies, like marbles, were imported for temples only [Martin, 1965, Wycherley, 1976] (see Figure 1 for the different temples present on each site).

Finally, these sites are all located in a similar environment, on the recent geological formations of the Corinth Rift. This point is crucial for determining recurrent patterns. However, although the geology is comparable at a regional scale, the local environments exhibit fundamental differences, in terms of both the exact lithologies available and geomorphological conditions. Moreover, the sites are close enough to have allowed exchanges of technology and building knowledge; thus, we anticipate that the main material differences between the sites should be due to their geology, rather than their historical development.

2.2. *Inside and outside the archaeological sites*

The building material inventory within each site is limited to macroscopic observations: however, each site has been visited multiples times and the nature of the studied stones meant that macroscopic descriptions were sufficient to distinguish between different facies. For architectural parts and other inaccessible remains (e.g. those destroyed or stored in museums), we relied mostly on previous works (archaeological reports, monographs and previous articles). The material descriptions are based on the classic criteria of sedimentary rock classification: grain size and shape, matrix characteristics, fossil assemblages and sedimentary structures present. The distribution in percentage of facies employed is based on our personal observations of the actual remains conserved. These percentages are estimated very approximately and represent only the very first step of a quantitative study of building materials; accordingly,

they are intended to be adjusted subsequently. Nevertheless, these calculations will allow us to determine the dominant or marginal facies used in construction based on numerical evidence.

Each archaeological site was studied separately for the sake of clarity. This choice originated from the quantitative approach applied in our survey (facies identification, percentage and number of facies). Site specificities are considered in the discussion to qualify our numerical results: that Corinth and Sikyon are city-states, whereas Isthmia and Perachora are sanctuaries under Corinthian influence.

The geological survey was conducted during field campaigns in 2019 and 2020. For each locality, the study focused on the lithologies available around the site, their accessibility and the characteristics of the local building stone resource. Cross-sections show the relationship between the remains and the environment, and sampling of natural outcrops allowed basic laboratory work to be undertaken. Thin sections were made at Sorbonne University, and density measurements were performed using the triple weighing method.

2.3. *Limits of the study*

The results are limited by the vestiges' quality, access and conservation, as well as the complex history of each site. Most remains are Roman and post-Roman in Corinth and Isthmia: Corinth was sacked by the Romans in 146 BC, and the sanctuary of Poseidon was abandoned for two centuries with the transfer of the Isthmian Games to Sikyon. The Archaic Temple of Isthmia was burned down and replaced by the Classical temple (with a marble roof), which was damaged by fire again in 394 BC. Moreover, most building stones used for this Classical temple and the wider site were re-employed for the Hexamilion Wall, a Roman fortification built from the 5th century AD to close the Isthmus [Gebhard and Gregory, 2015]. The city of Sikyon was destroyed in 303 BC by a Macedonian general and rebuilt uphill, on the current site [Lolos and Koskinas, 2011]: only predominantly Hellenistic remains are now available. The Perachora sanctuary was presumably abandoned around the 4th century AD and no modern city developed above it [Lefèvre-Novaro, 2000]).

All of the post-Greek modifications have introduced bias into the data corresponding to Greek

times: missing facies, repurposed building stone (or *spolia*) for new constructions and mistakes in the identification of Greek remains. Thus, only the verified Archaic to Hellenistic remains were studied: that is, buildings that are unanimously considered to be from these periods by the academic community. Pre-Archaic monuments and clearly Roman monuments, as well as Roman renovation work, were excluded.

3. Results

3.1. *The old city of Corinth*

3.1.1. *Topographic position and geomorphology*

The site is located on Neogene to Quaternary sediments of the Peloponnesus, southwest of modern Corinth (Figure 2). The Mesozoic limestone basement composes the Acrocorinth, 1 km southward, but no older, magmatic or metamorphic units outcrop in the vicinity of the site. This means that there was no direct access to marble, granite or gneiss, but only to all of the lithologies of the syn-rift series: conglomerates, sandstones and marls from fine to very coarse, of fluvial to deep marine origin [Bornovas et al., 1972].

The site extends 2 km south of the current coast, and lies on two marine terraces initially defined by Sébrier [1977]: the Temple Terrace (T3) (ca. 240 ka) and the Old Corinth Terrace (T4) (ca. 210 ka) (Figures 2 and 3, map). The limit between the two terraces is poorly documented: the modern city extends all around the archaeological site, leaving few natural and accessible outcrops, and eluvial deposits cover the terraces. The main part of the archaeological site is located on the Temple Terrace (T3), but the gymnasium and the Asklepieion, with Lerna's Spring, lie on the edge of the Old Corinth Terrace (T4) around 500 m northward (Figure 3, cross-section). The theatre, the first phase of which dates back to the 5th century BC, is built on the 30 m drop between the two terraces: the ancient Greeks took advantage of the difference in level to install bleacher seating. All these monuments, and most of the site, were used in the Roman period, when they were enlarged considerably [Sanders et al., 2018]. The Doric Temple of Apollo, ca. 23 m wide and 53 m long, seems deliberately built on the highest point of the archaeological site, and its foundations were carved directly

out of the substratum (Figure 3a). It is one of the oldest monuments in the site, built in the 6th century BC, and the city developed around this natural hill as indicated by the implantation of Hellenistic and Roman monuments on its sides (Figure 3c) [Andrikou, 2019].

3.1.2. *Sedimentary description and materials available*

The composition of the terraces differs more in terms of structure than lithology. The Temple Terrace (T3) corresponds to a single marine sequence: a 2-m-thick conglomeratic basal unit discordantly overlies the marls. Its thickness increases eastward, and a fine sandstone unit of beach sands overlies it. On top of the sandstone unit, two small transverse dunes, dated to 0.2 Ma and oriented E–W, form a 5-m-high and almost 1-km-long unit of oolitic sand with south-dipping sets and strong bioturbation (Figure 3, cross-section; Figure 3b, The Glauke Fountain is carved out of the dune). “Transverse” describes the dune morphology, in contrast to long linear dunes like that found at Examilia [Armijo et al., 1996, Collier and Thompson, 1991, Sébrier, 1977, von Freyberg, 1973]. Oolitic grainstone samples taken at Examilia show a density between 1.4 and 1.7 g/cm³ (number of samples measured: 11).

The youngest Old Corinth Terrace (T4) has a more complex structure, corresponding to two superimposed marine sequences with strong horizontal variability [Armijo et al., 1996]. The overall stratigraphy shows the following series over the marls: a discordant conglomeratic unit, a finer sand unit with marine bivalves or/and corals, a heterogeneous conglomeratic unit with centimetre-scale clasts (sometimes lacking, for example at the Asklepieion) and a thick beach-sand unit [Sébrier, 1977, von Freyberg, 1973] (Figure 3, cross-section).

The conglomerates, dune facies and beach-sand unit are exploitable for ashlar masonry. However, the sandstone units are too thin (less than 1 m).

3.1.3. *Building stones*

The Greek city of Corinth seems to be built entirely with the grainstone of the oolitic dunes, taken directly from the substratum: a small Temple named A, the Hellenistic stoa, the South and North stoa, the theatre and the Temple of Apollo are the main Greek buildings within the site (Figure 3, map). Oolitic

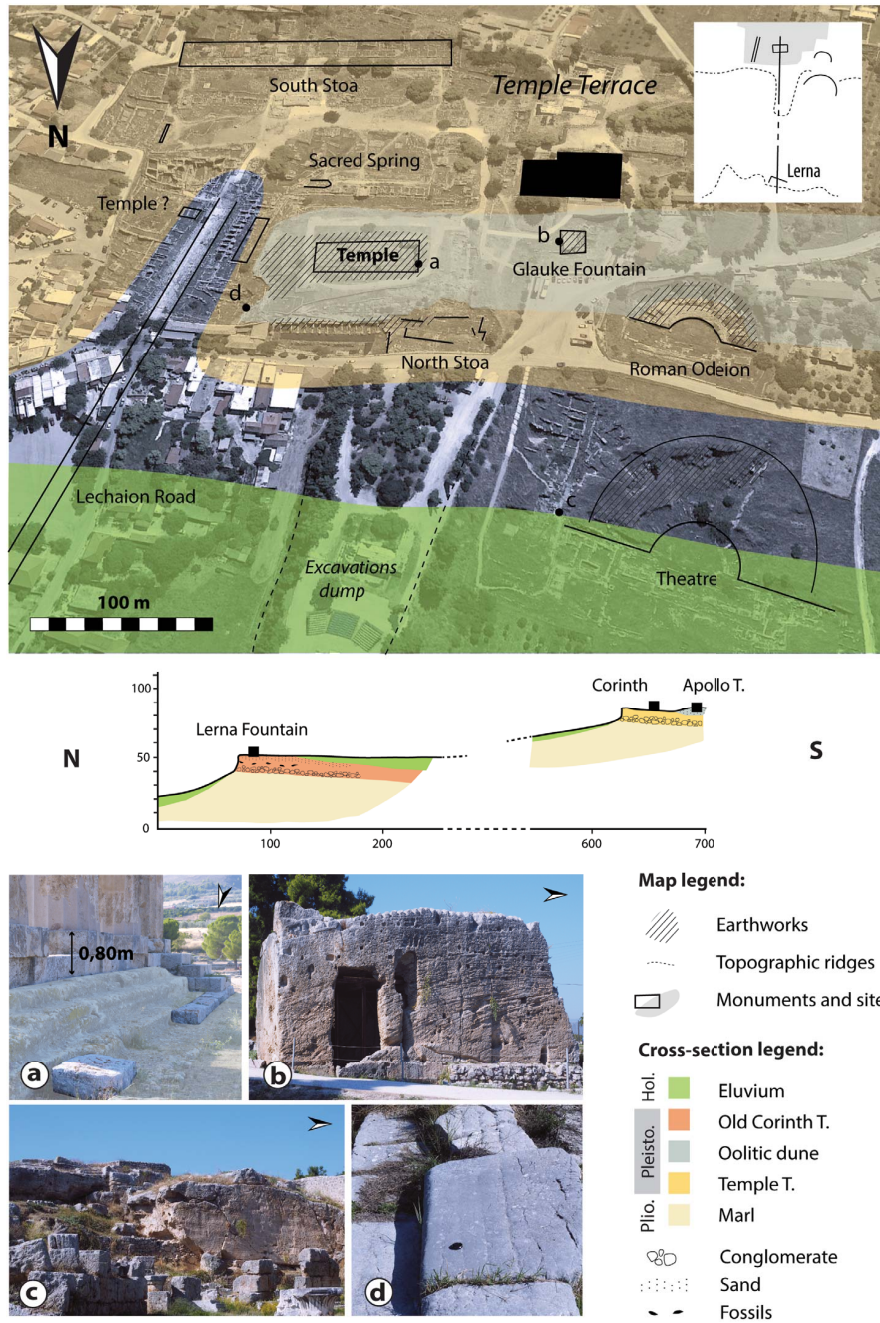


Figure 3. The old city of Corinth in its topographic and geological setting. Geoaerological map of the site with the main Greek buildings and geological units (base map from Google Earth (2020)). Simplified geological cross-section from the hill of Apollo to the Old Corinth Terrace at the Asklepieion [compiled and modified from Crouch, 2004, Dufaure and Zamanis, 1979, von Freyberg, 1973]. Pictures, (a) The frontal krepis of the Temple of Apollo, actual state, dug out of the oolitic dune (2020). (b) Glauke Fountains, also carved out of the oolitic dunes (2020). (c) Paved way to the theatre, in hard limestone (2019). (d) View from the Lechaion Road of the temple hill (2019). Positions of the cross-section and the pictures are shown on the geoaerological map.

grainstone was also used extensively in the Roman period, hiding the Greek remains. It is the only facies employed for ashlar masonry, apart from the path to the theatre, which is paved with hard limestone of the Mesozoic basement. This is the only known and significant use of this limestone, although the reasons behind this choice have yet to be understood (Figure 3d).

Hard dark limestones have been employed for a few bases scattered across the archaeological site, and black limestone blocks considered to be from Argos are documented as *spolia* on the Lechaion Road [Williams et al., 1974]. Marbles were used mainly for sculpture and occur very late and in limited quantities in Old Corinth masonry: the Temple of Apollo marble pavement is a Roman renovation [Andrikou, 2019, Johnson, 1931, Maniatis et al., 2020].

The oolitic dune extending west of the archaeological site is identified as a quarry line 1250 m long, with extensive quarrying [Hayward, 2003]. With a mean dune width and height of 25 and 5 m, respectively, this line corresponds to 150,000 m³ of material. The percentage loss during extraction and cutting is estimated to be around 25% depending on the nature of the stone [Amandry and Hansen, 2010], and not all of the dune was exploited: ca. 50,000 to 70,000 m³ of material may have been quarried out. Earthworks are clearly visible inside the site: extraction traces and blocks in place are found east of the Temple of Apollo and the temple's front *krepis*—the platform on which the building is erected—was carved out of the substratum. The *krepis* was covered with stone blocks, whereas the stylobate (the last bed of stones on which the columns were erected) and the columns are ashlar masonry (Figure 3a). The hard limestones could have originated from the Acrocorinth: the similarity in facies and its limited use within the site indicate a local provenance.

In summary, four lithologies have been documented at this site, but three of them (hard limestones, black limestones, white marbles) appear to represent less than 5% of the volume employed. The site is built of oolitic grainstone and on a quarry that seems sufficiently large to have supplied the material. The sandstones and conglomerates were not employed in construction, perhaps because the sandstone unit was too thin; even though the conglomerates are present in large amounts, the oolitic grainstone was definitively preferred by the builders.

3.2. Ancient Sikyon

3.2.1. Topographic position and geomorphology

The site of Sikyon lies south of the modern village of Vasiliko, on the western part of the uplifted marine terraces (Figure 2). No volcanic or metamorphic units are present, and the pre-rift limestone basement does not outcrop in the vicinity of the site (the Acrocorinth is more than 20 km to the south). The Neogene to Quaternary recent deposits of the Middle and Upper groups [Rohais and Moretti, 2017] are directly available and include the conglomerates and marls of the Middle Group, conglomerates of the Pleistocene terraces and recent alluvial deposits. Occasional units of sandstones and sedimentary travertine can be found outside the limits of the plateau [Koutsouveli et al., 1989, Tataris et al., 1970].

The plateau of Sikyon lies around 20 km west of Corinth and 5 km inland, surrounded by the Asopos and Helison valleys. It corresponds to three marine terraces, as defined by Sébrier [1977], from south to north broadly as follows: the Laliotis Terrace (2) (ca. 350 ka), the Temple Terrace (3) (ca. 240 ka) and the Old Corinth Terrace (4) (ca. 210 ka) (Figure 4, map). However, the vestiges are concentrated on the third terrace, even though the remains of the city wall can be found throughout the plateau. The theatre and the stadium take advantage of the large level difference between the Temple and Old Corinth terraces [Hayward and Lolos, 2015] (Figure 4, cross-section).

The vestiges correspond to the ancient acropolis, where the main buildings were excavated: a temple (perhaps dedicated to Apollo), ca. 11 m wide and 37 m long, built at the beginning of the Hellenistic period; a 106-m-long stoa or portico; a two-level palaestra, which occupied ca. 4500 m²; a 41 m² bouleuterion (a council house); one of the largest theatres of the Hellenistic period; and the stadium of ca. 200 m long [Lolos, 2016].

3.2.2. Sedimentary description and materials available

The data for Sikyon are summarised here. However, a more detailed study of the geological and geomorphological characteristics of the site and the identification of building materials in the archaeological site was undertaken by Ch. Hayward during the 2010s. The results should be published shortly as two chapters in the book of Lolos [2021].

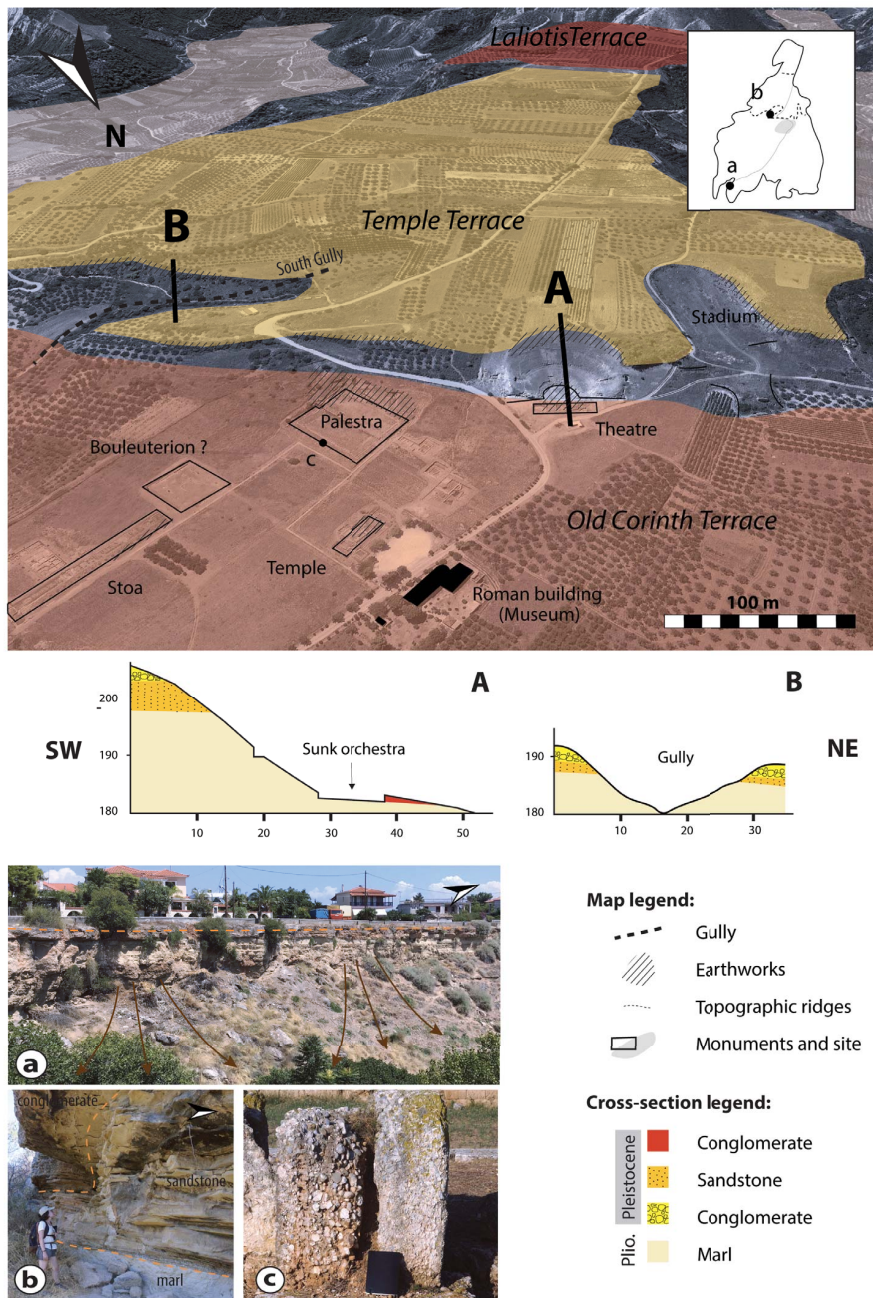


Figure 4. The old city of Sikyon in its topographic and geological setting. Geoarchaeological map of the site with the main Greek buildings and geological units (base map from Google Earth (2020)). A and B: simplified geological cross-sections through the theatre and the south gully [cross-section A modified from Hayward and Lolos, 2015]. Pictures, (a) The Old Corinth Terrace on the northern part of the plateau, under the modern city (2020). (b) Sandstone unit underlying the conglomerates and lying above the Corinthian marls, south gully (2020). (c) Architectural block of the archaeological site, in conglomerates (2019). Positions of the cross-sections and pictures are shown on the geoarchaeological map.

The terraces are similar to those in Corinth and exhibit little variation (Figure 4a). The absence of oolitic dunes above the Temple Terrace (3) conglomerates is the main difference, with the presence instead of two sandstone units. A layered unit composed mostly of quartz lies at the base of the Temple Terrace (T3), under the conglomerates (Figure 4b). Thin pebbly calcarenite units overlie the conglomerate on both terraces. For heterogeneous facies such as these conglomerates, accurate density measurement can be difficult to achieve, because their density varies depending on the proportion of limestone clasts (2.7 g/cm³).

The main lithologies available on the Sikyonian plateau are marls, sandstones and conglomerates. The Corinthian marls are unconsolidated, and the sandstones are too thin to be exploitable for ashlar masonry. Therefore, only the conglomerates and calcarenites present here could be used for construction.

3.2.3. Building stones

All of the conglomerates present here were employed on the site: for the temple's foundations, the stoa, the bouleuterion foundations, the palaestra and the stadium (Figure 4, map), as well as the defending and retaining city walls. These conglomerates are puddingstones, usually clast-supported, with clast sizes up to 10 cm in an argillaceous matrix; these stones are sourced directly from the terraces. They exhibit considerable variability in clast size, matrix proportion and degree of bioturbation. However, no clear link can yet be drawn between these variations and the use of this lithology in monuments (Figure 4c): these stones were employed for foundations, superstructures and columns, with clasts being cut and polished if needed. A local calcarenite was also used for the theatre and some architectural parts. Many quarry marks have been documented inside and around the archaeological site, on both marine terraces (Figure 4, map). According to the work of Ch. Hayward, the conglomerates were exploited most locally, while the calcarenite was almost entirely removed.

The only regional facies used for ashlar masonry is found in the temple and the bouleuterion: the temple pavement is constructed from oolitic grainstone (Figure 1b), and potentially its superstructure. Regional stones were probably used for statue

bases exhibited at the museum entrance, made of hard limestones of unknown provenance, but probably from the Mesozoic limestone basement. Allochthonous white marbles are not observed *in situ*: only very few small statue pieces were found in previous excavations and some *spolia* in the theatre, for example [Fossum, 1905].

In total, five different lithologies have been documented. Two of these are local and comprise more than 90% of the volume employed. The oolitic grainstone is a regional facies, even if its exact provenance cannot be determined. The same lithology outcrops between Sikyon and Corinth, 10 km eastward, and further away in the Corinthian region (the transversal and linear dunes defined above).

3.3. The sanctuary of Poseidon at Isthmia

3.3.1. Topographic position and geomorphology

The sanctuary of Poseidon is located in the modern village of Kyra Vrysi, 5 km inland from the Gulf of Corinth coastline and 1.5 km inland from the Saronic Gulf. It overlies consolidated Quaternary sediments of the Upper Group, representing an extension of the marine terraces of Corinth, which directly overlie the Lower Group because the Middle Group is missing here [Rohais and Moretti, 2017] (Figure 2). No metamorphic or magmatic units are present, and the closest outcrop of Mesozoic limestone is 4.5 km southward. Thus, only the recent syn-rift formations are available: marls, conglomerates and sandstones, fine to coarse, marine to detrital [Bornovas et al., 1972, Gaitanakis et al., 1985].

Normal faults and the drainage network here created the main topographic features of the region. The archaeological site lies on the southern edge of the Isthmia Graben, surrounded by the KIF and the TF [Collier, 1990] (Figure 2). The theatre was built on the step created by the offset of the Liopesi Fault, which dips northward. The settlement of Rachi is located on a hill that corresponds to the TF footwall. Three main gullies are present: one corresponds to the depression where the late stadium was built (Spardia Gully); one links the temple and the Roman baths (Temple Gully, subjective toponym); and the most important gully, Lepes Gully, bounds the site to the east.

As for Corinth, most buildings of the site indicate a complex history and a strong Roman influence. However, few remains are conserved: the Archaic temenos

dates back to the 7th century BC, with the first Archaic temple, ca. 14 m wide and 40 m long, and a long altar. After the Archaic temple was destroyed by fire in 470 BC, the Classical Doric Temple of Poseidon was then built above it [Broneer, 1971] and the long altar was enlarged, as was the peribolos. Isthmia was also one of the locations for the Panhellenic Games; different stadia succeeded each other, and the Games were removed by the Romans, until 44 BC where they came back at Isthmia. Finally, the theatre is mostly Roman, although a few remains indicate that its first use was during the Greek period [Gebhard, 1973]. The site was abandoned and most of its materials were reused after the 4th century AD.

3.3.2. *Sedimentary description and materials available*

The site is located on the Upper Group formation of the syn-rift infill, composed of marine sequences, more precisely on a transgressive unit of beach-to-shoreface conglomerate and sand with an erosive base, unconformably overlying the marls of the Middle Group (Figure 5, cross-section) [Collier, 1990, Rohais and Moretti, 2017]. This unit exhibits large facies variability in both space and time. It corresponds to coarse-to-fine conglomerates, comprising 50–80% rounded centimetre- to millimetre-scale pebbles of primarily crystalline limestones and red radiolarites, with few quartzites. Accurate density measurements of such heterogeneous facies can be difficult to achieve, because their density depends on the proportion of limestone clasts (ca. 2.7 g/cm³).

Small marine units have been documented here: they crop out 300 m west of Kyra Vrysi, in the extension of the Liopesi Fault, and correspond to a marine detrital conglomerate with bivalves and perforated pebbles underlying the polymictic conglomerates. Within Lepes Gully, a fossil-rich marine laminated and heavily bioturbated sandstone underlies the 2-m-thick conglomerates. South of the late stadium, a finer layered polymictic conglomerate with a calcareous matrix of small oolites crops out (Figure 5b). On the Rachi Hill, a restricted unit of dune facies overlies a coarse conglomeratic unit. It is an oolitic grainstone with few fine conglomeratic units, and planar and cross-stratifications are visible. It extends towards the northwest and is not observed elsewhere around the site, but is similar to the grainstones observed at

Corinth, Examilia and Kenchreai. No samples were obtained from the Rachi dune, but we consider its density to be similar to that of the oolitic dune of Examilia, i.e. around 1.6 g/cm³.

The conglomerates and oolitic grainstone from the Rachi Hill form thick homogeneous units that could be exploited for building materials. The other marine facies are too heterogeneous (in both nature and dimensions) and a small man-made cross-section, near the temple, illustrates the strong variability of this sequence (Figure 5c).

3.3.3. *Building stones*

The majority of the stones employed in the sanctuary of Poseidon consist of conglomerates and sandstones, including those used for the altar, the old and new peribolos, the stadium and the gateways. All of the facies observed in the field have been used in construction; however, there appears to be no logic determining the use of each sub-facies, with the exception of the shelly conglomerate and the impure oolitic grainstone. The shelly limestone was employed for foundations only (of two bases and the east gateway). This is attributable to the unit's spatial heterogeneity, forming no large exploitable unit. However, most of the site superstructure is missing, so this hypothesis should be treated with caution. The finer impure oolitic grainstone was employed for architectural parts, like the dripstone exposed just outside the museum. The conglomerates come directly from the substratum: earthworks are clearly visible around the temples and up to the theatre. The Rachi settlement also shows quarry marks and was exploited for building material that could have also supplied the site of Isthmia.

A different homogeneous sandstone used for the Archaic temple, finer than that used for the Classical temple, was described by Broneer [Broneer, 1959, 1955] [see Broneer, 1959, plate 59, picture c]. However, the few remains conserved for both temples are inaccessible (access is forbidden, and blocks are difficult to identify), so we cannot be sure of the nature of the stone used for either of the temples (Figure 5a, and Figure 1 illustrate the poor state of conservation). The Classical Temple may have employed the impure oolitic grainstone. Regional and allochthonous stones remain marginal: a black limestone, perhaps from Argos, was used for statue bases; white marbles for the Classical Temple of Poseidon (roof tiles, sima),

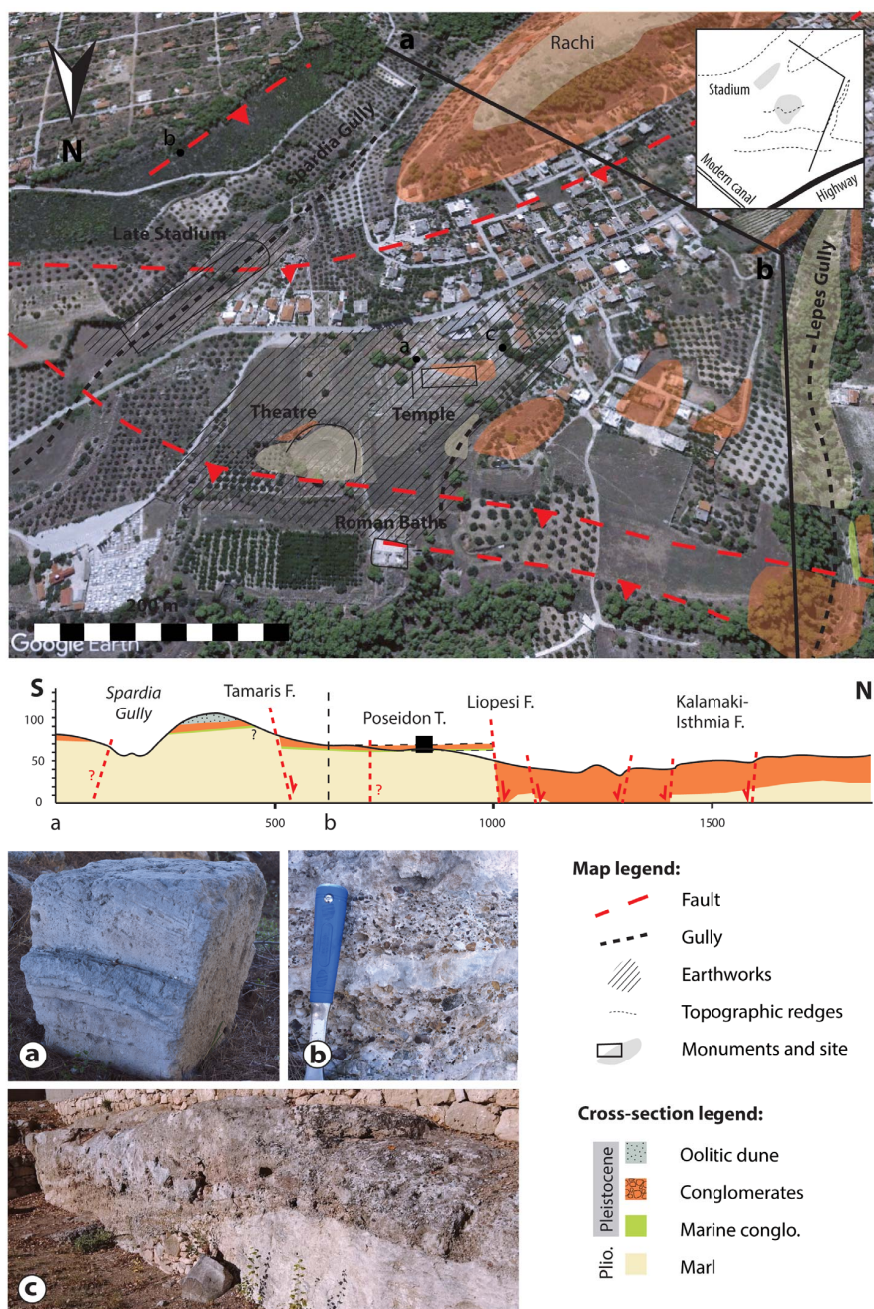


Figure 5. The sanctuary of Poseidon at Isthmia in its topographic and geological setting. Geoarchaeological map of the site with the main Greek buildings and geological units (base map from Google Earth (2020)). Simplified geological cross-section [compiled and modified from Collier et al., 1990, von Freyberg, 1973, and our own observations]. Pictures, (a) Architectural block of the archaeological site, in the oolitic facies (2019). (b) Conglomerate outcrop, south of Spardia Gully (2020). (c) Man-made cross-section inside the site, west of the temple, showing the organisation of the transgressive unit (2020). Positions of the cross-section and pictures are shown on the geoarchaeological map.

sculptures and statue bases; and grey-blue marbles from Laconia for sculptures [Broneer, 1958, Gebhard et al., 1998, Gebhard and Hemans, 1998, Sturgeon, 2015].

In summary, seven different facies have been documented here, although their origins have yet to be fully assessed. All of the conglomeratic sequence sub-facies were used and constitute almost 90% of the volume employed (fine to coarse conglomerate, marine conglomerate). The oolitic dune facies could have come from the Rachi Hill or the region of Corinth: both cases would indicate a well-considered choice for an important building, the Temple of Poseidon. A low diversity of local stones was observed for monumental masonry, whereas specific stones may have been employed for sculptural works, statue bases or fine architectural parts.

3.4. *The Heraeum at Perachora*

3.4.1. *Topographic position and geomorphology*

The Heraeum is located at the tip of the Perachora Peninsula, on a natural bay looking southward to the Gulf of Lechaïos. The coasts of Perachora and Corinth are approximately 10 km apart (Figure 2). The sanctuary sits on Quaternary deposits that cover the Mesozoic limestone basement. Sandstones, marls, stromatolites and limestones are directly accessible and flysch, schist and ophiolitic formations outcrop a short distance away within the peninsula, but no magmatic units or marbles are present [Bornovas, 1984].

The SAFS, along with sea-level variations, influenced the morphology of the western tip of the peninsula (Figure 2). Many active E–W oriented normal faults cut the limestone basement and recent formations; freshwater leakages along these faults caused stromatolite growth. The flat surfaces here are wave-cut platforms resulting from the sea-level variations [Robertson et al., 2020].

The lower sanctuary is located on the hanging wall of a major normal fault dipping southward, with the Doric Temple of Hera Akraia, built in the 6th century BC, having dimensions of ca. 10 m (width) and 30 m (length); a 4th century BC altar and L-shaped stoa are located east of the temple. The upper part lies on colluvium filling a fault-induced slump, including the Temple of Hera Limenia, which may also date from the 6th century BC, and a 35-m-long double-apsidal

cistern (Figure 6, map) [Payne, 1940]. The city associated with the sanctuary lies on the upper plain, approximately 500 m eastward and 50 m uphill, where an elaborate hydraulic system with monumental cisterns was dug into the ground (colluvium and recent sediments) [Tomlinson, 1969].

3.4.2. *Sedimentary description and materials available*

A succession of Neogene to Quaternary formations lies unconformably on the limestone basement, a blue karstic Mesozoic mudstone to wackestone. A Pliocene–Pleistocene unit, composed of marls, sands and conglomerates, is overlain by algal mound bioherms, also called stromatolites [Portman et al., 2005, Robertson et al., 2020]. Recent marine formations overlie the stromatolites, with colluvium deposited on the topographic troughs (Figure 6, cross-section).

The stromatolites grew along the faults with freshwater leakage on both coasts of the peninsula, but they are particularly well preserved to the north. They form large platforms with a dome morphology. Samples from the stromatolite quarry (?) (Figure 6, map) exhibit a density of 1.5 g/cm³ (number of samples measured: 7).

A large variety of facies is accessible: bioclastic fossil-rich limestones, sandstones, yellow marls and all of the sub-facies of the stromatolite dome (Figure 6b). The stromatolites and the limestone basement form large and homogeneous units exploitable for building material.

3.4.3. *Building materials*

Local stones represent the most employed facies: stromatolites, grey hard limestones and bioclastic limestones. The entire stromatolite dome sequence was used for ashlar masonry: the stromatolite rich-cavity build-up, the laminated stromatolite, the clastic-bearing and massive inner dome (Figure 6a and c). The bioclastic limestones come from the marine terraces above or below the stromatolite formations: the localised use of small amounts of these limestones in the altar pavement indicates a local origin. The hard limestones are not employed in the sanctuary or for hydraulic infrastructure, but used only as rubble in the city buildings, e.g. for house foundations.

Regional and allochthonous stones are marginal here: the oolitic grainstone from Corinth, and white

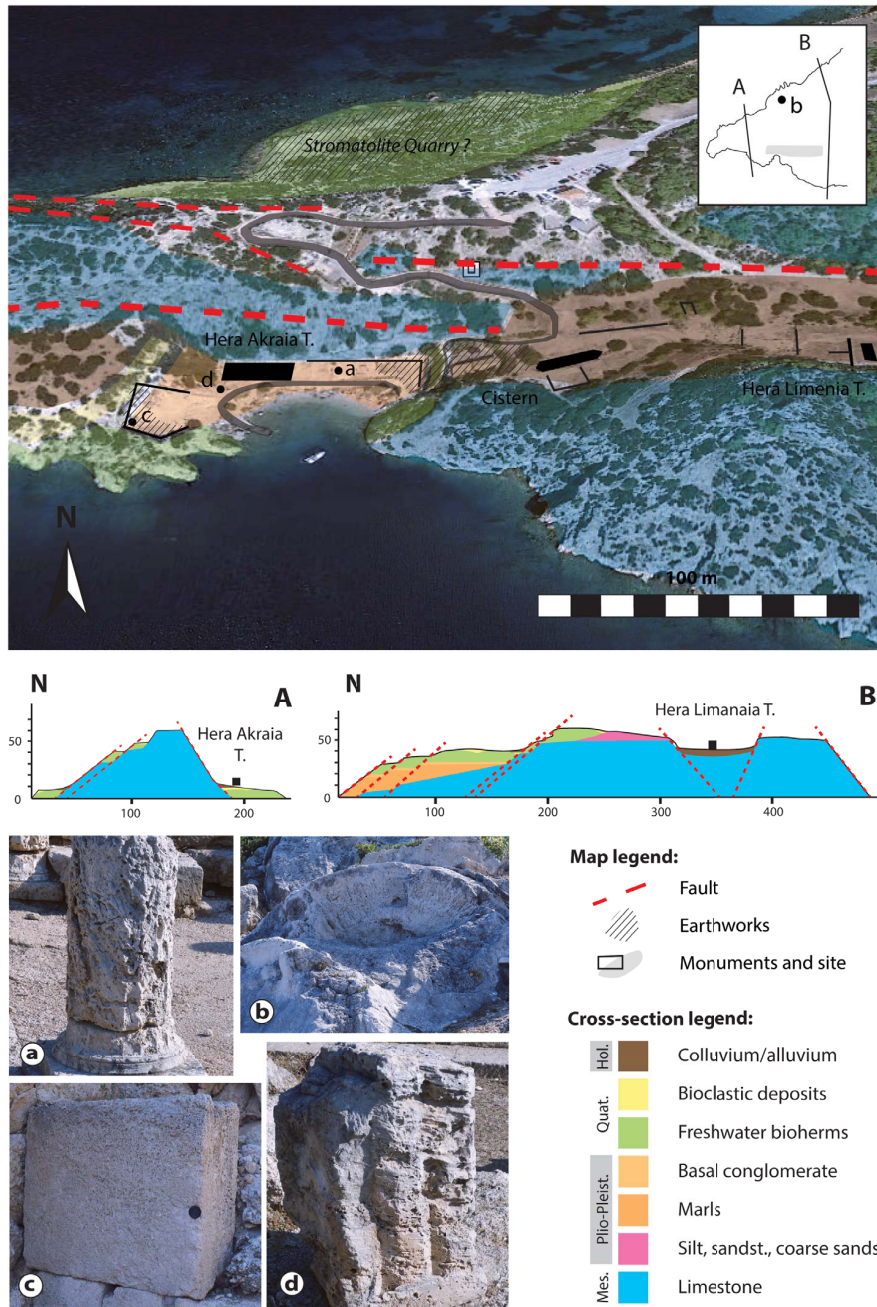


Figure 6. The Heraeum at Perachora in its topographic and geological setting. Geoarchaeological map of the site with the main Greek buildings and geological units (base map from Google Earth (2020)). A and B: Simplified geological cross-sections [compiled and modified from Andrews et al., 2007, Portman et al., 2005, Robertson et al., 2020, and our own observations]. Pictures, (a) Architectural block of the altar, in stromatolite rich-cavity build-up facies (2019). (b) (Man-made?) open stromatolite, north of the archaeological site (2020). (c) Clastic-bearing innerdome stromatolite block in the West Court of the archaeological site (2020). (d) Architectural block of the Temple of Hera Akraia, in oolitic facies (2019). Positions of cross-sections and pictures are shown on the geoarchaeological map.

marbles with other unknown origins, were employed for the Temple of Hera Akraia [Menadier, 1995].

In summary, five different facies have been documented here. More than 90% of the site has been built with the stromatolite sub-facies: it is an accessible and profitable resource (short distance from the quarry and large quantities available). We observed quarry marks on the north coast of the peninsula (Figure 6, map), and the fractured stromatolites could indicate human action. Quarry marks are also documented in the upper plain, north of the city [Tomlinson, 1969]. The local hard limestones are not employed in the sanctuary but as rubble within the city, unlike the allochthonous materials that are used only in the sanctuary, for the Temple of Hera Akraia.

4. Discussion

4.1. *Predominance of local high-porosity/low-density calcareous stones*

Ancient Greek builders prized local sedimentary stones for their public infrastructure: conglomerates in Sikyon and Isthmia, oolitic grainstone in Corinth, stromatolite in Perachora. These stones comprise more than 80% of the volume employed at each site. The economic criterion seems to dominate the choice of building material: local stones require no transport, and blocks produced by earthworks can be used directly in construction. The few archaeological sources available regarding stone costs, particularly the construction accounts for Delphi, Delos and Epidaurus, suggest that the stone itself had no real price [Mathé, 2010], and that the transport, cutting and laying of blocks dominated the overall cost of imported stones. We hypothesise that, by using local stones, stone costs would have been reduced significantly.

Additionally, geotechnical characteristics may have had some influence. The lithologies studied are usually called “*pôros*” in both modern and ancient literature: this refers to recent consolidated sediments with medium to low density, usually of light colour and easy to work with. Generally, it does not include conglomerates, although the finer conglomerate facies (in terms of granulometry) are sometimes referred to as *pôros*. High-porosity calcareous facies seem to have been sought after, like the calcarenite of Sikyon and the finer conglomerates of

Isthmia; this is clearly illustrated by the oolitic grainstone facies that was exploited and exported widely. It can be observed in other regions: in Thessaly, at Volos, travertine from 6 km away [Vaxevanopoulos et al., 2015] and oolitic limestones from 70 km away [Melfos et al., 2016] were imported for construction.

Although used extensively, conglomerates do not meet all of the criteria for a good building stone [Bessac and Sablayrolles, 2002]: they are heterogeneous and not particularly light, difficult and hazardous to cut and extract, inadequate for the finest architectural parts and subject to weathering. This is another argument for a primarily economic reason behind the choice of building material, as conglomerates were only used in the Corinth area when outcropping. A local breccia with similar properties was also employed in Delphi [de Vals et al., 2020]. However, conglomerates were not employed when an alternative existed, like the oolitic grainstone at Corinth.

In Sikyon and Isthmia, hard limestones are not directly available, but they outcrop at Perachora and in the vicinity of Corinth. However, they were not employed at all for ashlar masonry in any of the studied sites: this suggests that stone hardness was not a highly ranked criterion. The weight criterion seems more conclusive in the choice of building material: hard limestones were employed only when directly available and if no other less dense stones were present, in Delphi [de Vals et al., 2020] or in Epidaurus [Varti-Matarangas and Matarangas, 2000].

A poor diversity of facies was observed for local and regional stones: in general, a single local lithology was used for most of the site, and a maximum of five different facies in total have been identified at any one site. This is illustrated in Figure 7, with the number of facies for each site shown on the left. On the right, the graphic illustrates the distribution of stones by origin, in terms of volume (%), for each site. Each site was considered globally. Allochthonous facies can be varied, but they represent less than 5% of the stone volume employed and were not used for the large ashlar blocks. With the exception of Delphi, regional and allochthonous facies represent less than 15% of the total stone volume [de Vals et al., 2020].

For all of the studied periods, a high diversity of stones (more than ten) was observed in renowned sanctuaries in particular: in Epidaurus, Delphi and the Heraeum of Argos, for example. However, the

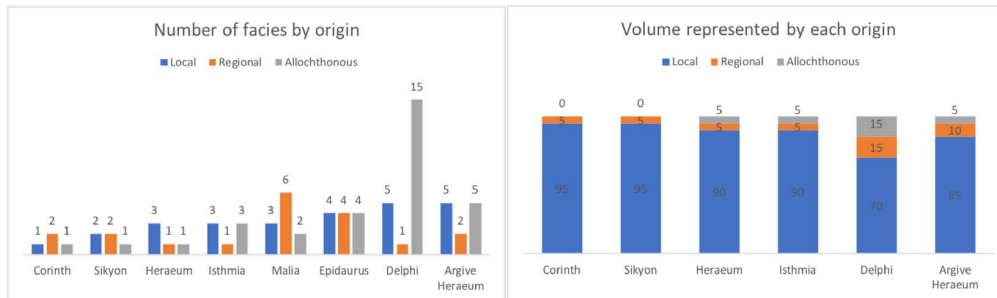


Figure 7. Left, the number of facies by origin (local, regional, allochthonous) at the four studied sites and four other sites: Epidaurus [Varti-Matarangas and Matarangas, 2000], Delphi [de Vals et al., 2020], the Argive Heraeum [Pfaff, 2003] and Malia [Dimou et al., 2000]. Right, the volume of each facies by origin. Marbles were excluded for the comparison by number of facies; they are negligible in terms of volume.

last two sites exhibit a high diversity of white allochthonous marbles: four different types were identified [Maniatis et al., 1988, Pfaff, 2003]. Such detailed investigations were not undertaken for all of the archaeological sites: white marbles were generally counted as a single facies, which biases the comparison. Moreover, ten different porous allochthonous limestones have been observed in Delphi: as of now, this is considered an exception. Delphi, Epidaurus and the Argive Heraeum also exhibit medium diversity for hard limestones (more than three facies), which are absent at the four sites studied here.

These data should be qualified based on site history and geology. The archaeological sites discussed above are located within different geological settings: on the syn-rift infill of the Gulf of Corinth (present study), or directly on or next to the Mesozoic limestone basement (Delphi, Epidaurus, Argive Heraeum, Malia). Furthermore, Epidaurus, Delphi and the Argive Heraeum are located more than 10 km inland, and less expensive sea transport was prized. Epidaurus and Delphi were renowned within the Panhellenic world in Classical times, whereas Malia was a Minoan palace. This means that the builders did not have access to the same stones or the same economic resources. They also did not have the same aim: in the Panhellenic sanctuaries, the Ancient Greeks wanted to show their gratitude by building wealthy treasuries and monuments. In contrast, constructions in city-states are more practical (fortification walls, stoa, agora). These data put our study into perspective, but the comparison should be treated with caution.

4.2. Specific stones for specific uses

One regional facies recurs in all of the sites: the oolitic grainstone, a dune facies of Corinthian provenance. We do not know the exact origin: three main outcrops have been identified, in Corinth (tidal transverse dunes), near Examilia (tidal longitudinal dunes) and near Kenchreai (transverse dunes) [Collier and Thompson, 1991] (Figure 2). The determination of distinctive criteria between these different dunes would require more in-depth work and sampling of the sites. At Isthmia, we hypothesise that the facies used for the Archaic Temple of Poseidon is a dune facies. We base this assumption on a recurrent pattern observed in the region: the temples of Sikyon, Perachora and Kleonai (personal observations) used the same facies of Corinthian origin.

The imported stones, regional or allochthonous limestones, were usually employed only in the temples. The Corinthian dune facies was also used for many treasures (small temples or buildings to display offerings) and for the Temple of Apollo from the 4th century BC at Delphi [de Vals et al., 2020]. Our observations confirm the conclusions of previous works [Martin, 1965, Wycherley, 1976], which noted that allochthonous stones were employed for large-scale public infrastructure. However, previous studies referred mostly to marbles and did not separate clearly the different “*pôros*”. Our conclusion is that the use of allochthonous stones concerns more specifically temples, and is applicable also to less prestigious stones (not only marbles); this includes high-porosity limestones with fine granulometry such as the oolitic dune facies in the eastern part of the Gulf of Corinth.

Local facies dominate ashlar masonry, but different materials were observed, sometimes specifically between foundations and superstructures; this includes the temples at Sikyon and Perachora (Figure 1), but also other monuments and bases, for example, the bouleuterion of Sikyon. This is common in Greek construction, even if not recurrent in our study. This pattern has been observed at other sites: the Temple of Apollo from the 4th century BC at Delphi and the second Classical temple of the Argive Heraeum both have soft limestone foundations with a hard limestone pavement [de Vals et al., 2020, Pfaff, 2003].

Finally, imported stones are typically used for temples, but this was not observed in Corinth, which employed a local limestone for its Temple of Apollo. This raises the question of the dominant criterion determining the choice of building materials, if there is just one: is it a purely economic decision, or do prestige and mechanical characteristics come into play? A similar situation has been observed in Athens: the Parthenon is made entirely of marble, mostly because it was the nearest viable resource. However, we cannot answer this question for now: the Archaic Temple of Corinth, which does not include marble, is also one of the oldest temples built during the 6th century BC in the Doric style, just at the beginning of the extensive marble trade [Martin, 1965].

4.3. *Exploitation of the environment*

Earthworks are visible inside each site and have furnished building materials, produced by small limestone quarries. In Corinth, it is plausible that the oolitic dune facies inside the city was sufficient to provide the city, at least in Greek times, but this hypothesis has yet to be verified because other large quarries near Corinth exploited similar dune facies. The small quarries near Sikyon, Isthmia and Perachora provided materials only for their respective cities: owing to their size and stone character, these quarries were not suitable for exportation. This is coherent with what is known of Greek stone exploitation: quarries were often small, episodic and tied to specific construction projects [Fant, 2009].

Many small porous limestone quarries have been documented in Greece [Koukouvou, 2012]. However, the lack of in-depth and consistent studies of these quarry types has prevented the determination of large-scale trends; accordingly, the prevailing

knowledge of limestone exchange is certainly biased, unlike our knowledge of the marble trade [Al-Bashaireh, 2021]. For example, large sedimentary stone quarries that exported their materials are known in the Greek world: the quarries of Aegina Island [Koukouvou, 2012] and the quarries of the Corinth area (Examilia, Kenchreai) [Hayward, 2003]. Oolitic limestone quarries are documented in Thessaly, at Tyrnavos, which furnished with building materials Larissa (17 km away), Volos (70 km away) and ancient Demetrias (next to Volos) [Melfos et al., 2016]. The Kleonai quarries [Marchand, 2002], the quarries of the Asomata region in Central Macedonia [Koukouvou, 2010] and the Piraeus quarries [Theoulakis and Bardanis, 2000] are very large high-porosity-limestone quarries but seem to have provided building material for one unique site each (Nemea, Aigai and Athens, respectively).

Freshwater resources abound in the studied region, with monumental fountains and developed hydraulic systems at all sites, as predicted by Crouch [2004]. The builders of the sites also took advantage of the main topographic features: in Corinth, Isthmia and Sikyon, the theatres rest on the steepest slope close to the site. Faults or natural terraces caused these anomalies and revealed the unconsolidated marls underlying the hardpans. Then, the Greek builders used the marls depending on their cohesiveness: ashlar blocks were added for the seat when too soft (Corinth, Isthmia); otherwise, the seating was carved out directly (top of the theatre at Sikyon).

5. Conclusions

We presented in this paper a large-scale study of four Archaic to Hellenistic Greek sites within their geological environment, the eastern part of the Gulf of Corinth. The comparison of building materials for ashlar masonry allowed us to define some trends.

- Ancient builders took advantage of the main topographic features of the sites, with the construction of theatres occurring on natural slopes, cliffs, faults or terrace offsets.
- Primarily, local lithologies were employed. They represent more than 90% of the stone volume and were sourced mostly from earthworks.
- Usually, one local facies was found to be predominant, which suggests that choices were

made based primarily on the economic criterion.

- As a result, with access to porous sedimentary building material, the sites studied here exhibit low facies diversity (<5).
- Recent low-density sedimentary stones of the syn-rift deposits were preferred even when other facies were available: at Perachora, the Mesozoic basement (2.7 g/cm³) and the stromatolites (1.5 g/cm³); at Corinth, the conglomerates (between ~2 and 2.7 g/cm³) and the oolitic grainstone (1.4 to 1.7 g/cm³).
- Greek builders rarely imported hard limestones (Argos stones, Mesozoic basement) but could import the finest high-porosity facies for temples, as illustrated by the Corinthian oolitic grainstone.

Our conclusions should be tested with a larger group of sites, particularly sites lying directly on the limestone basement with no direct access to recent porous limestones. This could contribute to a better comparison and understanding of limestone use and trade in Greek construction. We have shown that allochthonous limestone facies, other than marbles, should not be overlooked: they are also exported for specific use in religious monuments. It will also be important to look more closely at the geotechnical characteristics of stones, for which we have only scratched the surface here: density seems a decisive factor, but stone behaviour regarding water (permeability, porosity, capillarity) should not be overlooked.

Conflicts of interest

Authors have no conflict of interest to declare.

Acknowledgements

This work was supported financially and materially by the French School at Athens, who granted the doctoral contract of Ms. de Vals, and Sorbonne University in Paris. Fieldwork authorisation in the Corinth area was given by the Hellenic Survey of Geology and Mineral Exploration (HSGME). Density measurements were carried out at the Cergy-Pontoise University Laboratory. We thank Y. Lolos for giving us access to the pre-publication of his synthesis on Sikyon and A. Perrier for many discussions about Delphi. We also

thank Isotope Editing for editing a draft of this manuscript.

References

- Al-Bashaireh, K. (2021). Ancient white marble trade and its provenance determination. *J. Archaeol. Sci.: Rep.*, 35, article no. 102777.
- Amandry, P. and Hansen, E. (2010). *Topographie et Architecture. Le Temple d'Apollon du IVe Siècle, Fouilles de Delphes*. de Boccard, Paris, France.
- Andrews, J. E., Portman, C., Rowe, P. J., Leeder, M. R., and Kramers, J. D. (2007). Sub-orbital sea-level change in early MIS 5e: New evidence from the Gulf of Corinth, Greece. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 259, 457–468.
- Andrikou, D. (2019). The Temple of Apollo at Corinth. Observations on the Architectural Design. In Moropoulou, A., Korres, M., Georgopoulos, A., Spyrakos, C., and Mouzakis, C., editors, *Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage, Communications in Computer and Information Science*, pages 22–35. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Armijo, R., Meyer, B., King, G. C. P., Rigo, A., and Papanastassiou, D. (1996). Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophys. J. Int.*, 126, 11–53.
- Bell, R. E., McNeill, L. C., Bull, J. M., Henstock, T. J., Collier, R. E. L., and Leeder, M. R. (2009). Fault architecture, basin structure and evolution of the Gulf of Corinth Rift, central Greece. *Basin Res.*, 21, 824–855.
- Bessac, J.-C. and Sablayrolles, R. (2002). Problématique archéologique des carrières antiques en Gaule. *Gallia*, 59, 3–9.
- Bornovas, J. (1984). *Geological map of Greece, Kaparellion sheet (1:50,000)*. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Bornovas, J., Lalechos, N., and Filippakis, N. (1972). *Geological map of Greece, Korinthos sheet (1:50,000)*. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Broneer, O. (1955). Excavations at Isthmia, 1954. *Hesperia: J. Am. Sch. Class. Stud. Athens*, 24, 110–141.
- Broneer, O. (1958). Excavations at Isthmia: Third Campaign, 1955–1956. *Hesperia: J. Am. Sch. Class.*

- Stud. Athens*, 27, 1–37.
- Broneer, O. (1959). Excavations at Isthmia: Fourth Campaign, 1957–1958. *Hesperia: J. Am. Sch. Class. Stud. Athens*, 28, 298–343.
- Broneer, O. (1971). *Temple of Poseidon, Isthmia*. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA.
- Collier, R. E. L. (1988). *Sedimentary Facies Evolution in Continental Fault-Bounded Basins Formed by Crustal Extension: The Corinth Basin, Greece*. PhD thesis, University of Leeds.
- Collier, R. E. L. (1990). Eustatic and tectonic controls upon Quaternary coastal sedimentation in the Corinth Basin, Greece. *J. Geol. Soc.*, 147, 301–314.
- Collier, R. E. L. and Dart, C. J. (1991). Neogene to Quaternary rifting, sedimentation and uplift in the Corinth Basin, Greece. *J. Geol. Soc.*, 148, 1049–1065.
- Collier, R. E. L., Leeder, M. R., and Maynard, J. R. (1990). Transgressions and regressions: a model for the influence of tectonic subsidence, deposition and eustasy, with application to Quaternary and Carboniferous examples. *Geol. Mag.*, 127, 117–128.
- Collier, R. E. L., Leeder, M. R., Rowe, P. J., and Atkinson, T. C. (1992). Rates of tectonic uplift in the Corinth and Megara Basins, central Greece. *Tectonics*, 11, 1159–1167.
- Collier, R. E. L. and Thompson, J. (1991). Transverse and linear dunes in an Upper Pleistocene marine sequence, Corinth Basin, Greece. *Sedimentology*, 38, 1021–1040.
- Crouch, D. P. (1993). *Water Management in Ancient Greek Cities, Water Management in Ancient Greek Cities*. Oxford University Press, Oxford, NY, USA.
- Crouch, D. P. (2004). *Geology and Settlement: Greco-Roman Patterns*. Oxford University Press, Oxford, NY, USA.
- de Vals, M., Gastineau, R., Perrier, A., Rubi, R., and Moretti, I. (2020). The stones of the Sanctuary of Delphi – Northern shore of the Corinth Gulf – Greece. *BSGF - Earth Sci. Bull.*, 191, article no. 11.
- Dia, A. N., Cohen, A. S., O’Nions, R. K., and Jackson, J. A. (1997). Rates of uplift investigated through ²³⁰Th dating in the Gulf of Corinth (Greece). *Chem. Geol.*, 138, 171–184.
- Dimou, E., Schmitt, A., and Pelon, O. (2000). Recherches sur les matériaux lithiques utilisés dans la construction du palais de Malia : étude géologique. *Bull. Corresp. Hell.*, 124, 435–457.
- Dufaure, J.-J. and Zamanis, A. (1979). Un vieux problème géomorphologique : les niveaux bordiers au sud du Golfe de Corinthe (An old geomorphological problem : the levels developed on the southern border of the gulf of Corinth). *Bull. Assoc. Gogr. Fr.*, 56, 341–350.
- Fant, J. C. (2009). Quarrying and stoneworking. In Oleson, J. P., editor, *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World*. Oxford Handbooks, Oxford, NY, USA.
- Fossum, A. (1905). The Theatre at Sikyon. *Am. J. Archaeol.*, 9, 263–276.
- Gaitanakis, P., Mettos, A., and Fytikas, M. (1985). *Geological map of Greece, Sofikon sheet (1:50,000)*. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Gebhard, E. R. (1973). *The Theater at Isthmia*. University of Chicago Press, Chicago, IL, USA.
- Gebhard, E. R. and Gregory, T. E. (2015). *Bridge of the Untiring Sea: The Corinthian Isthmus from Prehistory to Late Antiquity*. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA.
- Gebhard, E. R. and Hemans, F. P. (1998). University of Chicago Excavations at Isthmia: II. *Hesperia: J. Am. Sch. Class. Stud. Athens*, 67, 1–63.
- Gebhard, E. R., Hemans, F. P., and Hayes, J. W. (1998). University of Chicago Excavations at Isthmia, 1989: III. *Hesperia: J. Am. Sch. Class. Stud. Athens*, 67, 405–456.
- Hayward, C. L. (2003). The geology of Corinth: Study of a basic resource. In Williams, C. K. and Bookidis, N., editors, *Corinth XX. The Centenary, 1896–1996*. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA.
- Hayward, C. L. and Lolos, Y. (2015). Building the Early Hellenistic Theatre at Sikyon. In *The Architecture of the Ancient Greek Theatre. Acts of an International Conference at the Danish Institute at Athens 27–30 January 2012*, Monographs of the Danish Institute at Athens, page 468. Aarhus University Press, Aarhus, Denmark.
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., McIntyre, A., Mix, A. C., Morley, J. J., Pisias, N. G., Prell, W. L., and Shackleton, N. J. (1984). The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}O$ record. In Berger, A., Imbrie, J., Hays, H., Kukla, G., and Saltzman, B., editors, *Milankovitch and Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop held 30*

- November–4 December, 1982 in Palisades, NY, page 269. D. Reidel Publishing, Dordrecht, The Netherlands.
- Johnson, F. P. (1931). *Corinth IX. 1. Sculpture, 1896–1923, Corinth*. American School of Classical Studies, Cambridge, MA, USA.
- Keraudren, B. and Sorel, D. (1987). The terraces of Corinth (Greece) – A detailed record of eustatic sea-level variations during the last 500,000 years. *Mar. Geol.*, 77, 99–107.
- Kershaw, S. and Guo, L. (2003). Pleistocene cyanobacterial mounds in the Perachora Peninsula, Gulf of Corinth, Greece: structure and applications to interpreting sea-level history and terrace sequences in an unstable tectonic setting. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 193, 503–514.
- Kershaw, S. and Guo, L. (2006). Pleistocene calcified cyanobacterial mounds, Perachora Peninsula, central Greece: a controversy of growth and history. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, 255, 53–69.
- Koukouvou, A. (2010). *Poros quarries in the area of ancient Veroia: a study on building stone quarrying in antiquity*. PhD thesis, Aristotle University of Thessaloniki.
- Koukouvou, A. (2012). *Quarrying Stone. From the Aomata quarries to the buildings of the Macedonian kings. A study on quarrying poros limestone in antiquity*. Kornelia Sfakianaki Editions, Thessaloniki, Greece.
- Koutsouveli, A., Mettos, A., Tsapralis, V., Tsaila-Monopolis, S. T., Ioakim, C. H., and Mavrides, A. (1989). *Geological map of Greece, Xylokastro sheet (1:50,000)*. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Le Pichon, X. and Angelier, J. (1979). The hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the eastern mediterranean area. *Tectonophysics*, 60, 1–42.
- Leeder, M. R., Mack, G. H., Brasier, A. T., Parrish, R. R., McIntosh, W. C., Andrews, J. E., and Duermeijer, C. E. (2008). Late-Pliocene timing of Corinth (Greece) rift-margin fault migration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 274, 132–141.
- Leeder, M. R., Portmann, C., Andrews, J. E., Collier, R., Finch, E., Gawthorpe, R. L., McNeill, L., Perez-Arlucea, M., and Rowe, P. (2005). Normal faulting and crustal deformation, Alkyonides Gulf and Perachora peninsula, eastern Gulf of Corinth rift basin, Greece. *J. Geol. Soc.*, 162, 549–561.
- Lefèvre-Novaro, D. (2000). Le culte d'Héra à Pérachora (VIII-VIe s.) : essai de bilan. *Rev. Études Grecques*, 113, 42–69.
- Lolos, Y. (2016). L'architecture à Sicyone pendant la haute époque hellénistique. In *L'architecture Monumentale Grecque Au IIIe Siècle A. C.*, volume 40 of *Ausonius Mémoires*, pages 51–82. Institut Ausonius, Bordeaux, France.
- Lolos, Y. (2021). *Sikyon I: the urban survey*, Institute of Historical research, volume 82 of *Meletemata*. National Hellenic Research Foundation, Athens, Greece.
- Lolos, Y. A. and Koskinas, A. (2011). *Land of Sikyon: Archaeology and History of a Greek City-state*. Hesperia Supplement 39. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA.
- Lykousis, V., Sakellariou, D., Moretti, I., and Kaberi, H. (2007). Late Quaternary basin evolution of the Gulf of Corinth: Sequence stratigraphy, sedimentation, fault–slip and subsidence rates. *Tectonophysics. Deep struct. fault arrays surf. process. act. graben: Gulf Corinth*, 440, 29–51.
- Maniatis, Y., Mandi, V., and Nikolaou, A. (1988). Provenance Investigation of Marbles from Delphi with ESR Spectroscopy. In Herz, N. and Waelkens, M., editors, *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade, NATO ASI Series*, pages 443–452. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Maniatis, Y., Tambakopoulos, D., Lazzarini, L., and Sturgeon, M. C. (2020). Provenance Investigation of Three Marble Relief Sculptures from Ancient Corinth: New Evidence for the Circulation of the White Marble from Mani. *Archaeometry*, 63(4), 685–704.
- Marchand, J. C. (2002). *Well-built Kleonai: A History of the Peloponnesian City Based on a Survey of the Visible Remains and a Study of the Literary and Epigraphic Sources*. University of California, Berkeley, CA, USA.
- Martin, R. (1965). *Manuel d'Architecture Grecque. I : Matériaux et Techniques*. A. et J. Picard, Paris, France.
- Mathé, V. (2010). *Le prix de la construction en Grèce aux IVe et IIIe siècles avant J.-C. : étude sur les chantiers financés par les sanctuaires de Delphes, d'Epidaure et de Délos*. PhD thesis, Lyon 2.
- Melfos, V., Vaxevanopoulos, M., Tsvilika, M., and Vavaliou, M. (2016). Mineralogical and C–O isotopic characteristics of the oolitic limestone of Per-

- achora, Tyrnavos, Thessaly, Greece. In *The Ancient Quarries and some Particular uses During Antiquity*, pages 143–144. Presented at the 41st International Symposium on Archaeometry-ISA, Kalamata.
- Menadier, B. (1995). *The Sixth Century BC temple and the Sanctuary and Cult of Hera Akraia*. PhD thesis, University of Cincinnati.
- Moretti, I., Sakellariou, D., Lykousis, V., and Micarelli, L. (2003). The Gulf of Corinth: an active half graben? *J. Geodyn., Act. Faults: Anal. Process. Monit.*, 36, 323–340.
- Orlandos, A. K. (1968). *Les Matériaux de Construction et La Technique Architecturale des Anciens Grecs*. E. de Boccard, Paris, France.
- Papanikolaou, D. J. and Royden, L. H. (2007). Disruption of the Hellenic arc: Late Miocene extensional detachment faults and steep Pliocene-Quaternary normal faults—Or what happened at Corinth? *Tectonics*, 26(5), article no. TC5003.
- Papanikolaou, I. D., Triantaphyllou, M., Pallikarakis, A., and Migiros, G. (2015). Active faulting at the Corinth Canal based on surface observations, borehole data and paleoenvironmental interpretations. Passive rupture during the 1981 earthquake sequence? *Geomorphol. Geomorphol. Act. Faulting Seism. Hazard Assess.: New Tools Future Chall.*, 237, 65–78.
- Payne, H. (1940). *Perachora: The Sanctuary of Hera Akraia and Limenia*. Clarendon Press, Oxford, UK.
- Pfaff, C. A. (2003). *The Argive Heraion: The architecture of the classical temple of Hera*. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA.
- Portman, C., Andrews, J. E., Rowe, P. J., Leeder, M. R., and Hoogewerff, J. (2005). Submarine-spring controlled calcification and growth of large *Rivularia* bioherms, Late Pleistocene (MIS 5e), Gulf of Corinth, Greece. *Sedimentology*, 52, 441–465.
- Robertson, J., Roberts, G. P., Iezzi, F., Meschis, M., Gheorghiu, D. M., Sahy, D., Bristow, C., and Sgambato, C. (2020). Distributed normal faulting in the tip zone of the South Alkyonides Fault System, Gulf of Corinth, constrained using ³⁶Cl exposure dating of late-Quaternary wave-cut platforms. *J. Struct. Geol.*, 136, article no. 104063.
- Rohais, S. and Moretti, I. (2017). Structural and Stratigraphic Architecture of the Corinth Rift (Greece): An Integrated Onshore to Offshore Basin-Scale Synthesis. In Roure, F., Amin, A. A., Khomsi, S., and Al Garni, M. A. M., editors, *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins of the Arabian Plate and Surrounding Areas, Frontiers in Earth Sciences*, pages 89–120. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- Sanders, G. D. R., Palinkas, J., Tzonou-Herbst, I., and Herbst, J. (2018). *Ancient Corinth: Site Guide*. American School of Classical Studies at Athens, Princeton, NJ, USA, 7th edition.
- Sébrier, M. (1977). *Tectonique Récente d'une Transversale à l'Arc Egéen: Le Golfe de Corinthe et ses Régions Périphériques*. Paris Sud Centre d'Orsay.
- Sturgeon, M. C. (2015). New Sculptures from the Isthmian Palaimonion. *Hesperia Suppl.*, 48, 159–192.
- Tataris, A., Maragoudakis, N., and Kounis, G. (1970). Geological map of Greece, Nemea sheet.
- Theoulakis, P. and Bardanis, M. (2000). The stone of Piraeus at the monuments of the Acropolis of Athens. In Fassina, V., editor, *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, pages 255–263, Amsterdam, The Netherlands. Elsevier Science B. V.
- Tomlinson, R. A. (1969). Perachora: The Remains outside the Two Sanctuaries. *Annu. Br. Sch. Athens*, 64, 155–258.
- Varti-Matarangas, M. and Matarangas, D. (2000). Microfacies analysis and endogenic decay causes of carbonate building stones at the Asklepieion Epidaurus monuments of Peloponnessos, Greece. *J. Cult. Herit.*, 1, 165–177.
- Vaxevanopoulos, M., Melfos, V., Skafida, E., and Karnaava, A. (2015). Diachronic use of travertine for building purposes at the archaeological site “Kastro-Palaia” in Volos. pages 321–329. Presented at the ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΡΓΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΚΑΙ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ 4 Volos [Archaeological work of Thessaly and Central Greece].
- Vettor, T., Sautter, V., Pont, S., Harivel, C., Jolivet, L., Moretti, I., and Moretti, J. C. (2021). Delos Archaeological Marbles: A Preliminary Geochemistry-Based Quarry Provenance Study. *Archaeometry*, 63(5), 907–922.
- von Freyberg, B. (1973). *Geologie des Isthmus von Korinth*. Erlanger Geologische Abhandlungen, Erlangen, Germany.
- Williams, C. K., MacIntosh, J., and Fisher, J. E. (1974). Excavation at Corinth, 1973. *Hesperia: J. Am. Sch.*

Class. Stud. Athens, 43, 1–76.
Wiseman, J. (1978). *The Land of the Ancient Corinthians*. P. Åström, Göteborg, Sweden.

Wycherley, R. E. (1976). *How the Greeks Built Cities*.
WW Norton & Co, New York, NY, USA, New edition.

3.3 Utilisation des pierres dans un sanctuaire panhellénique : Delphes (article)

Les résultats sur le site de Delphes ont été publiés en 2020 dans le Bulletin de la Société Géologique de France (de Vals *et al.* 2020).

Ce travail propose une vue exhaustive des pierres mises en œuvre dans le sanctuaire de Delphes. Situé dans la zone du Parnasse, au pied d'une faille normale liée à l'ouverture du Golfe de Corinthe, le sanctuaire d'Apollon est majoritairement construit en calcaires, brèches et marbres. Des sédiments peu consolidés, récents, d'origine et de faciès variés appelés *pôros* (voir [1.4.2](#)), sont également utilisés. L'identification des différents faciès a été menée sur le site, ainsi que dans les carrières locales, dans le but de retrouver la provenance des différents matériaux. Les calcaires sont clairement locaux et proviennent de la plateforme carbonatée, d'âge Jurassique Supérieur à Crétacé, de la Téthys, reprise en compression lors de la formation de la chaîne des Hellénides. Ces calcaires du Massif du Parnasse correspondent à la majeure partie du volume de roche mis en œuvre ; un faciès spécifique de calcaire maastrichtien, appelé le calcaire de Saint-Élie, a été utilisé pour les édifices les plus prestigieux tels que le temple d'Apollon. La carrière antique correspondante se trouve à quelques kilomètres à l'ouest du site. Les brèches de pente ont aussi largement été employées : elles affleurent autour et dans le site archéologique et recouvrent les formations mésozoïques. Enfin, les roches appelées *pôros* correspondent ici à des faciès très variés ; sept types ont pu être reconnus dont du travertin, des *grainstones* à oïdes, des calcaires marins et des grès grossiers. Tous ces faciès récents sont présents sur les côtes sud-est du Golfe de Corinthe, mais à l'exception des *grainstones* à oïdes, les carrières d'origine n'ont pas encore été précisément localisées.

Dans la thèse, pour la continuité de présentation des données, le site de **Delphes** est identifié comme site n°1 et les matériaux de construction sont présentés plus en détail dans le [chapitre 5](#).

The stones of the Sanctuary of Delphi – Northern shore of the Corinth Gulf – Greece

Marilou de Vals^{1,*}, Renaldo Gastineau^{2,3}, Amélie Perrier^{4,5}, Romain Rubi^{2,6} and Isabelle Moretti¹

¹ Sorbonne Université, CNRS-INSU, IStEP, UMR 7193, 75005 Paris, France

² Université Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, UMR 6118, 35000 Rennes, France

³ Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR, ISterre, 38000 Grenoble, France

⁴ Université d'Orléans, IRAMAT, UMR 5060 Centre Ernest-Babelon, 45100 Orléans, France

⁵ École Française d'Athènes, 10680 Athens, Greece

⁶ Université de Liège, Département de Géographie, Liège, Belgium

Received: 21 December 2019 / Accepted: 15 April 2020

Abstract – The choice of stones by the ancient Greeks to build edifices remains an open question. If the use of local materials seems generalized, allochthonous stones are usually also present but lead to obvious extra costs. The current work aims to have an exhaustive view of the origins of the stones used in the Sanctuary of Delphi. Located on the Parnassus zone, on the hanging wall of a large normal fault related to the Corinth Rift, this Apollo Sanctuary is mainly built of limestones, breccia, marbles, as well as more recent poorly consolidated sediments generally called *pôros* in the literature. To overpass this global view, the different lithologies employed in the archaeological site have been identified, as well as the local quarries, in order to find their origins. The different limestones are autochthons and come from the Upper Jurassic–Cretaceous carbonate platform of the Tethys Ocean involved in the Hellenides orogen. Those limestones of the Parnassus Massif constitute the majority of the rock volume in the site; a specific facies of Maastrichtian limestone called “Profitis Ilias limestone” has been used for the more prestigious edifices such as the Apollo Temple. The corresponding ancient quarry is located few kilometers west of the sanctuary. Then, slope breccia has been largely used in the sanctuary: it crops out in and around the site and is laying on top of the carbonates. Finally, the *pôros* appear to be very variable and seven different facies have been documented, including travertine, oolitic grainstone, marine carbonates and coarse-grained sandstones. All these recent facies exist in the south-east shore of the Gulf of Corinth, although – except for the grainstone – the quarries are not yet known.

Keywords: Delphi / Gulf of Corinth / archaeology / building materials

Résumé – Les pierres du sanctuaire de Delphes, Marge nord du Golfe de Corinthe, Grèce. Le choix des pierres de construction par les anciens Grecs reste à ce jour une question ouverte. Si l'emploi de matériaux locaux semble dominer, les faciès allochtones sont aussi présents. Ce travail propose une vue exhaustive des pierres mises en œuvre dans le sanctuaire de Delphes. Situé dans la zone du Parnasse, au pied d'une faille normale liée à l'ouverture du Golfe de Corinthe, le sanctuaire d'Apollon est majoritairement construit en calcaires, brèches et marbres. Des sédiments peu consolidés, récents, d'origine et de faciès variés appelés *pôros* dans les sources textuelles antiques, appellation souvent reprise dans la littérature moderne, sont également utilisés. L'identification des différents faciès a été menée sur le site, ainsi que dans les carrières locales, dans le but de retrouver la provenance des différents matériaux. Les calcaires sont clairement locaux et proviennent de la plate-forme carbonatée, d'âge Jurassique Supérieur à Crétacé, de la Téthys, reprise en compression lors de la formation de la chaîne des Hellénides. Ces calcaires du Massif du Parnasse correspondent à la majeure partie du volume de roche mis en œuvre; un faciès spécifique de calcaire maastrichtien, appelé le calcaire de Saint-Élie, a été utilisé pour les édifices les plus prestigieux tels

*Corresponding author:

marilou.de_vals@sorbonne-universite.fr

que le temple d'Apollon. La carrière antique correspondante se trouve à quelques kilomètres à l'ouest du site. Les brèches de pente ont été aussi largement employées : elles affleurent autour et dans le site archéologique et recouvrent les carbonates mésozoïques. Enfin, les roches appelées *pôros* correspondent à des faciès très variés ; sept types ont pu être reconnus dont du travertin, des grainstones à oolites, des carbonates marins et des grès grossiers. Tous ces faciès récents sont présents sur les côtes sud-est du Golfe de Corinthe, mais à l'exception des *grainstones* à oolites, les carrières d'origine n'ont pas encore été précisément localisées.

Mots clés : Delphes / Golfe de Corinthe / archéologie / matériaux de construction

1 Introduction

1.1 Context of the study

The study of monumental architecture in Greek Antiquity is usually approached with an historical, archaeological and architectural points of view, in order to better understand the building techniques and the socio-economic environment of the construction sites. In this study, the approach is focused on the building materials, which must have been one of the first and key question for the ancient craftsmen as for their sponsors. Wood, soil, terracotta and rock are the main materials employed; however, from the 7th century BC, stones became predominant in monumental construction (Martin, 1965; Lawrence, 1996). The question of the rock's origin has been the center of many studies, in Greece and all around the world; but in the case of Greece, those studies usually focused on materials today considered to be prestigious, such as marbles (Waelkens *et al.*, 1992; Attanasio *et al.*, 2000; Jockey *et al.*, 2011; Antonelli and Lazzarini, 2015).

This paper aims for a more global approach to the question of the building materials in ancient Greece, taking into account the immediate environment and regional geology in our reflection. The fact that local lithologies are predominant and were clearly favored in ancient constructions has already been noticed by many authors (Martin, 1965), the transport for long distance presented obvious difficulties and expensive costs (Hansen, 2000).

This research project is part of the program "The Stones in Delos and Delphi" launched by the French School at Athens. It aims to better define this global scheme by achieving an exhaustive overview of the different stones used in those two large sanctuaries of Apollo. The current paper presents the results of this ongoing study in the case of Delphi. After a short geological setting of the Gulf of Corinth area and a small overview of the historical context of the Sanctuary, the various stones found will be described from a macro- and microscopic points of view. When already known, the provenance of the stones will be discussed. The relative use of stones will be synthesized through a global lithological map of the Apollo sanctuary.

The marbles will not be mentioned in that study; they are anyway all imported, the closest marble outcrop being located in Livadia, 50 kilometers away from Delphi (Déroche *et al.*, 1989); this marble is black. The main ancient white marble quarries are located in the Athens area or the Cycladic Islands (Maniatis *et al.*, 1988; Palagia and Herz, 2002). The focus is here on the other stones, that were clearly not selected and used randomly by the builders in Delphi.

In the archaeological literature, the Greek word *pôros* refers to many facies with a high porosity, in opposition to the already compacted rocks, such as low porosity limestones, magmatic rocks and marbles (Martin, 1965). However, it does not correspond to a specific facies: there is no homogeneity in terms of depositional environment, lithology or age. *Pôros* is also the name of an island in the Saronic Gulf where calcarenite and eolianite are present – these rocks are called de facto *pôros* by the archeologists – but depending on the location, it may correspond to completely different facies. One of the results is the list and characteristics of the various *pôros* of Delphi in order to overpass this imprecise terminology.

1.2 Geological setting

The geodynamic history of the eastern Mediterranean region has been dominated by the convergence of Africa and Eurasia since the Mesozoic, inducing subduction, collision and obduction processes (Sengör and Yilmaz, 1981; Dercourt *et al.*, 1986; Ricou *et al.*, 1986; Ricou, 1994; Menant *et al.*, 2016). In this context, the Mount Parnassus, standing 2457 meters above Delphi, has been formed during the Hellenides orogen, since the Late Cretaceous, by thrusting Mesozoic limestone platforms of the Thetys margin. Three different structural domains are present near Delphi: the Parnassus Nappe which overlaps the Pindos Nappe to the West and is overthrust by the Pelagonian Nappe of the Internal Hellenides eastward (Fleury, 1980; Doutsos *et al.*, 2006; Jolivet and Brun, 2010; Royden and Papanikolaou, 2011; Menant *et al.*, 2016) (Fig. 1).

Due to the clockwise rotations of the region between 15 and 8 Ma (Kissel and Laj, 1988; Morris and Anderson, 1996; van Hinsbergen *et al.*, 2005; Brun and Sokoutis, 2007; Jolivet *et al.*, 2015), the Hellenides are now oriented in a close to north-south direction. Since the Miocene, in consequence of the migration of the subduction toward the south and the westward propagation of the North Anatolian Fault, the Hellenides are affected by north-south extension localized in the active grabens of Corinth, Evia, and within the Central Hellenic Shear Zone (Armijo *et al.*, 1996; Papanikolaou and Royden, 2007) (Fig. 1).

The Parnassus Nappe is composed of: (1) neritic limestones from the Trias to the Upper Cretaceous; (2) pelagic limestones from the Campanian to the Maastrichtian; (3) a red pelite of the Paleocene and flysch (Eocene). Four bauxite horizons correspond to emersion of the carbonate plate-form and hiatus (Fleury, 1980; Mettos *et al.*, 2009) (Fig. 2A).

The Corinth area is one of the fastest rifts in Europe with an opening rate of ca. 1.5 cm/year (Moretti *et al.*, 2003). Its

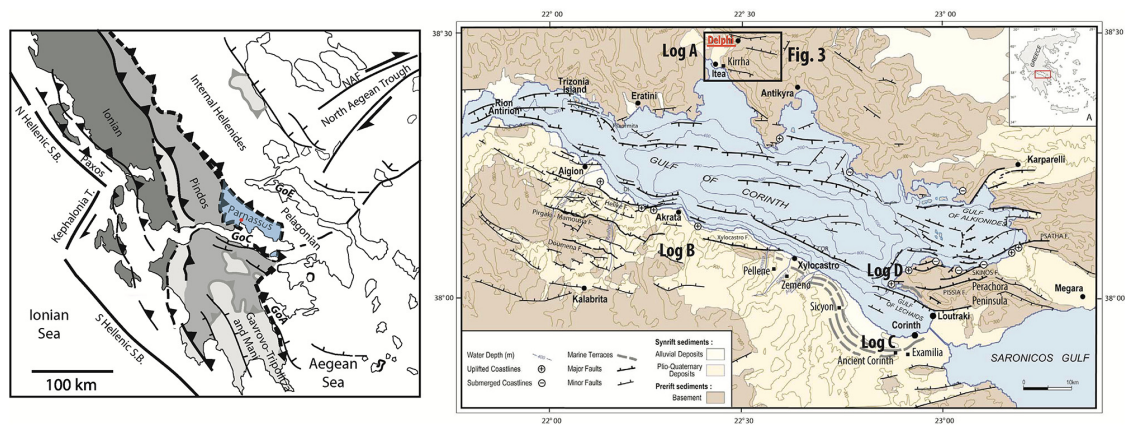


Fig. 1. Left: global map of Greece showing the geodynamic setting of the Gulf of Corinth (GoC) with the different nappes composing the external (shades of grey) and internal (white) Hellenides. The blue corresponds to the Parnassus Nappe. GoA: Gulf of Argolikos; GoE: Gulf of Evia; SB: subduction boundary; NAF: North Anatolian Fault (modified from Rohais and Moretti, 2017). Right: zoom on the Gulf of Corinth, showing the main locations mentioned in the text, and the areas corresponding to the stratigraphic columns (Log A, B, C and D) presented in Figure 2 (modified from Moretti *et al.*, 2003).

evolution is rather well constrained (Ori, 1989; Taylor *et al.*, 2011; Ford *et al.*, 2013; Nixon *et al.*, 2016; Ford *et al.*, 2017; Rohais and Moretti, 2017; Gawthorpe *et al.*, 2018) and could be divided in three phases: (1) an initiation phase dominated by small-extension continental and lacustrine sedimentation called the Lower Group; (2) an increase of the fault activity associated with a connection of the basins leads to a deep-water lacustrine to marine sedimentation referred as the Middle Group; (3) since 1 Ma the uplift of the Peloponnese exhumed the syn-rift deposits on the southern shore and the deltaic systems shifted northward (Fig. 2B). Marine terraces of the Upper Pleistocene have been exposed (Fig. 2C) and, locally, Quaternary stromatolitic deposits in the Perachora Peninsula (Fig. 2D). On the northern shore of the Gulf, Oligo-Miocene sedimentation is mainly missing and Quaternary slope breccia lays in discordant contact on top of the Mesozoic limestones and Eocene flyschs in most part of the region (Pomoni-Papaioannou, 1994; Gregou *et al.*, 1994; Solakius *et al.*, 1998; Solakius and Kati, 2001).

The Sanctuary of Delphi is located on the northern margin of the Corinth Gulf, about 600 meters above the sea level and 10 kilometers from the coast. It lays on the hanging wall of the major normal fault dipping southward, the Arachora–Delphi–Amphissa Fault. Another large normal fault dipping northward, borders the Pleistos Valley, south of Delphi (Piccardi, 2000; Piccardi *et al.*, 2008; Valkaniotis *et al.*, 2011) (Fig. 3).

1.3 The Apollo Sanctuary of Delphi

Most of the archaeological site of Delphi was excavated during the period called “la Grande Fouille” between 1892 and 1903 by the French School of Archaeology at Athens. It released an exceptional complex composed of the Apollo Sanctuary, the Athena Sanctuary, two monumental fountains –Castalia and Kerna–, a stadium, a gymnasium and parts of the ancient city (Fig. 3).

Activities linked to the Apollo Sanctuary are attested since the 7th century BC and until the 4th century AD, but the panhellenic sanctuary became particularly important between the 6th and the 4th century BC. Greek cities, mediterranean kingdoms, illustrious families or prominent individuals came to consult the Oracle, dedicate offerings and build treasuries in honor of Apollo (Jacquemin, 2000). The panhellenic games, the *Pythian Games*, took place in Delphi every four years since the Archaic Period, bringing together people from all the Hellenic World as well as riches for the city (Bommelaer and Laroche, 2016).

The sanctuary underwent a lot of transformation and enlargement during its existence (de La Coste-Messelière, 1969). The Apollo Sanctuary was laid out on several terraces and has been modified and enlarged, especially during both important reconstruction phases of the Temple, following its accidental destruction (Amandry and Hansen, 2010; Perrier, 2019). The Apollo Temple burnt down in 548/7 BC and has to be reconstructed and the peribolos, the wall surrounding the sacred area, was enlarged. In 373/2 BC, the temple was destroyed by a landslide. The latest temple (of which the remains are still visible today, and called the New Temple by opposition to the Old Temple) was reconstructed with a local limestone of high quality, the Profitis Ilias limestone, which has been extracted for the first time on this occasion (Amandry and Hansen, 2010; Bommelaer and Laroche, 2016).

2 Material and method

2.1 Inside the archaeological site

The main goal of this paper is to present an exhaustive list of the lithologies that could be observed in the archaeological site of Delphi—the Apollo Sanctuary, the stadium and the Athena Pronaia Sanctuary (Fig. 3). The Gymnasium, as well as the Castalian fountains, were not accessible during the fieldwork for security reasons, and the antique city which has not been excavated and mapped precisely yet.

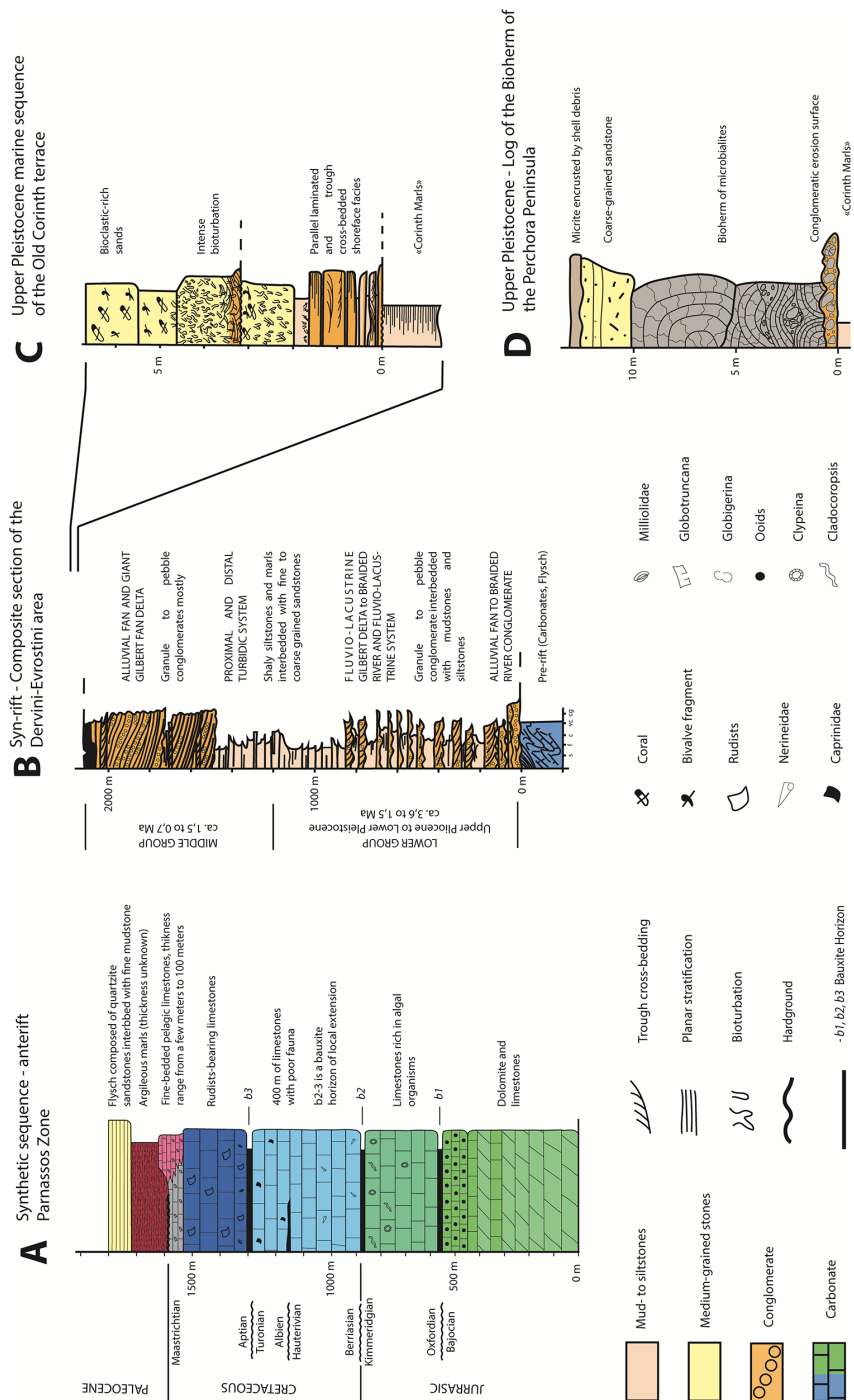


Fig. 2. A. Synthetic stratigraphic column of the Parnassos Nappe in the region of Delphi (modified from Fleury, 1980; Gielisch, 1993; Carras, 1995; Nirta *et al.*, 2018). Recent sedimentary formations located on the south coast of the Gulf of Corinth. B. Composite section of the Dervini-Evrostini area (Rohais *et al.*, 2007). C. Sedimentary log of the Old Corinth terrace (Collier and Thompson, 1991; Armijo *et al.*, 1996). D. Synthetic section of the Perachora Peninsula (D) (Bouleugon, 2016). See Figure 1 for locations.

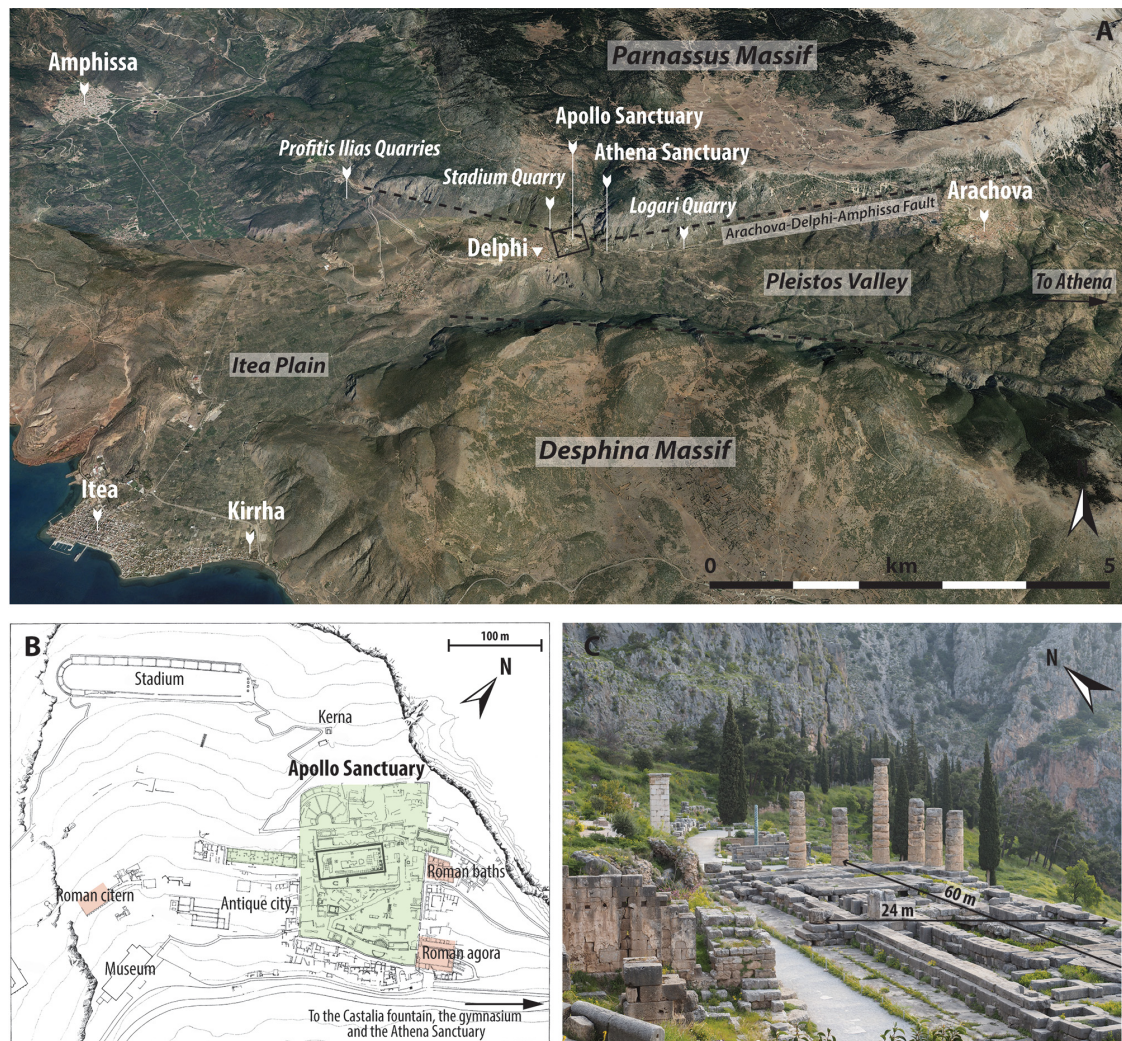


Fig. 3. The archaeological site of Delphi. A. Aerial view of the Pleistos Valley where Delphi stand, with the main cities, quarries and toponyms, and the two mains faults (Google Earth). B. Map of the archaeological complex with the Apollo Sanctuary in green, and the Roman vestiges in red; 5 meters between the contour lines (modified from [Bommelaer and Laroche, 2016](#)). C. Picture of the Apollo Temple on the Sanctuary, standing at the hanging wall of the Arachova-Delphi-Amphissa Fault.

The description of building materials differs from the ones applied on outcrops since destructive sampling is forbidden in protected archeological sites. Systematic macroscopic descriptions were first completed, taking into account geological characteristics (fossil content, sedimentary petrology, sedimentary structures), with the use of a portable digital microscope (Dino-Lite®). This method allows to distinguish between different types of *póros* but has not been sufficient to differentiate between different types of limestone. These first order descriptions and the knowledge of the regional geology of Delphi allowed us to discriminate between materials which have been extracted from the region, and materials which were imported from elsewhere (facies that were not observed in the Parnassus nappe). For allochthonous materials, the

microscopic description of the sedimentary facies allowed us to make assumption on their provenance.

2.2 Outside the archaeological site

Samplings were proceeded in the surrounding of the archaeological site to add more information on local facies. Two different cases were encountered: (1) the exact provenance of the facies is known (ancient quarries); or (2) the exact provenance is unknown. In the first case, samples were taken near the antique quarry. In the second case, samples were taken the closest to the archaeological site, on outcrops suspected to have been exploited in ancient times but that do not show any evidences. In total, fifteen thin sections of the

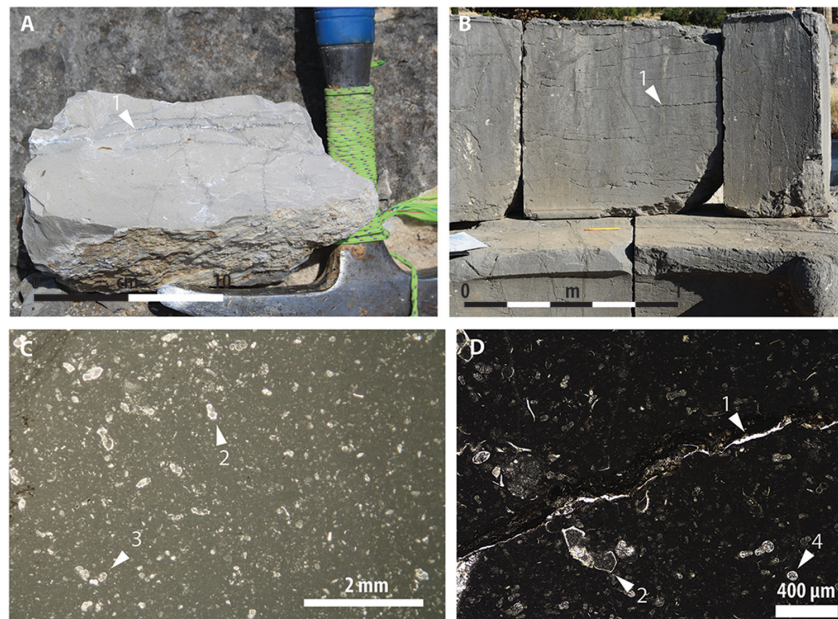


Fig. 4. Profitis Ilias limestone. A. Sample of limestone from the Profitis Ilias quarry, presenting its natural color light grey and stylolitic joints (1). B. Blocks of Profitis Ilias limestone employed in the Apollo Sanctuary. Stylolitic joints are still visible despite its dark grey patina. C. Microscopic view showing *Globotruncana arca* (Cushman, 1926) (2) and *Globigerina* (3) in a micritic cement. D. Specimen of *Globotruncana arca* (Cushman, 1926) (2), a stylolitic joint (1), a calcisphere (4).

samples were made as well as some basic petrophysical measurements: density and porosity were measured using an automatic gas pycnometer (AccuPyc II 1340) at the laboratory GeoRessources of the University of Lorraine. One sample of each facies of carbonate were analyzed.

3 Results: the stones of the sanctuary

3.1 Petrological description of the stones

3.1.1 The limestones

Profitis Ilias limestone (Fig. 4)

This facies has been sampled near the ancient quarries of Profitis Ilias, 5 km west of Delphi (see Fig. 3 for the location of the quarry), after which the stone is named. The Profitis Ilias limestone is a massive wackestone with thick beds up to 2 meters and presents many stylolitic joints parallel to the bedding (Fig. 4A), straight calcitic veins, generally perpendicular to the joints, and few centimetric nodule of cherts. The facies color is light grey and appears dark grey or dark blue in surface due to the alteration, which make it easily recognizable (Fig. 4B).

Thin sections document a marine fossiliferous assemblage composed of calcispheres and pelagic foraminifera, which represent 15 to 20% of the grains, in a micritic matrix. We identified: *Globigerina*s, *Globotruncana stuarformis* (Dalbiez, 1955), and *Globotruncana arca* (Cushman, 1926), which is, with only one keel, attributed to the Early Maastrichtian (Figs. 4C and 4D). This facies has a density of 2.65 g.cm^{-3} and a very low porosity of 1.15%.

Pink limestone (Fig. 5)

The reference outcrop used for the description of this facies is in a modern quarry, 12 kilometers eastward of Delphi, near the modern town of Arachova (Fig. 3). The outcrop has a thickness of max. 10 meters and a length of ca. 100 meters with beds of 1 or 2 meters in thickness. It displays many small stylolitic joints, interrelated and parallels to the bedding, and calcitic veins up to 2 centimeters without general orientation (Fig. 5A). Its characteristic color varies from dark pink to grey, and its alteration color is grayish (Fig. 5B).

The Pink limestone is a wackestone with more than 40% of grains in a micritic matrix. The thin sections show a grain composition of planktonic foraminifera: *Rugoglobigerina rugosa* (Plummer, 1927) (Fig. 5C), *Globotruncanella pschadae* (Keller, 1946) (Fig. 5D), *Abathomphalus mayaroensis* (Bolli, 1951) (Fig. 5E). These foraminifera date the formation of the Maastrichtian. Gasteropods and multi-chamber uniaxial foraminifera are observed (Fig. 5C). Petrophysics properties show a density of 2.68 g.cm^{-3} and a very low porosity of 0.84%.

Rudist limestone (Fig. 6)

A massive dark limestone with beds up to 1 meter crops out just west and south of the archaeological site, under the modern road leading to the modern town of Delphi (Fig. 3). Two main end-members can be observed: a floatstone composed of fragmentary rudists in a micritic matrix, and a boundstone built of rudists reefs, that are easily recognizable in employed blocks (Fig. 6A). Some rudists observed on the outcrops are parts of the *Hippuritidae* and *Radiolitidae* families (Fig. 6B).

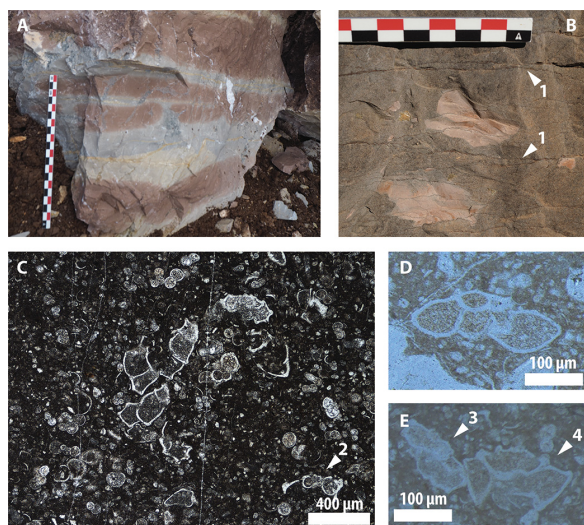


Fig. 5. Pink limestone. A. Outcrop at the modern quarry of Arachova, 12 km east of Delphi (Fig. 3 for location), showing the color's variation of the rock; stylolitic joints are also present but not visible on this photo. B. Block of Pink limestone used in the Apollo Sanctuary showing several stylolitic joints (1). C. Microscopic view showing the numerous foraminifera in micrite. *Rugoglobigerina rugosa* (Plummer, 1927) (2). D. *Globotruncanella pschadae* (Keller, 1946). E: *Abathomphalus mayaroensis* (Bolli, 1951) (3); *Globotruncana ventricosa* (White, 1928) (4). Red, white and black rectangles on the scale represents 1 cm.

Thin sections show a highly fractured floatstone with calcitic veins: fragments of rudists, recrystallized bioclasts and unidentified algae in micritic matrix, partly recrystallized into sparite (Fig. 6C). Very few multi-chamber benthic foraminifera from the *Miliolidae* family and planktonic biserial foraminifera have been observed (Fig. 6D). This facies has a density of 2.68 g.cm^{-3} and a porosity less than 1%.

Parnassus limestones (Fig. 7)

This limestone's outcrop presents beds up to 2 meters and an important rate of karstification highlighted by small surfaces and large-scale dissolution features: lapiez, microkarsts, karsts (Figs. 7A–7C). Samples are taken near the Stadium Quarry, located hundred meters just above the sanctuary, at the foot of the cliff (Fig. 3).

Two subfacies are identified: one subfacies is a grainstone composed exclusively of ooids (less than 0.5 mm in size) cemented by sparite (Fig. 7D). The other subfacies is a very heterogeneous and fractured wackestone (60% of grains) composed of pellets, algae, crinoids and others biological remains (Fig. 7E). Centimetric oncooids, with irregular cortex, are also observed in the outcrop (Fig. 7A). The wackestone has a density of 2.68 g.cm^{-3} and a low porosity of 0.8%.

3.1.2 The breccia

The slope breccia crops out in the immediate surrounding of the sanctuary. This facies is defined by angular polygenic

limestone clasts ranging from gravel to boulder cemented by a reddish clay matrix (Fig. 8A). The limestone composing the breccia shows two different sub-facies which correspond to the *Parnassus* limestone (Fig. 8B).

Fault breccias are also present in the surroundings of Delphi, around the core of the Amphissa Fault (see for instance Fig. 3D in Moretti *et al.*, 2003). However, fault breccia is not observed in the sanctuary as building material: the lack of available volume in comparison to the large mass of slope breccia may be an explanation.

3.1.3 The *pôros*

As already mentioned, this study did not aim to create a new definition of the generic term *pôros*, but to present a list of stones called *pôros* within the archaeological site of Delphi. In that case, seven types of stones have been distinguished, numbered from P1 to P7 (Fig. 9). Due to the restriction of sampling on the site, only macroscopical observations were carried out, on building stone out of their geological context, using a portable microscope. It cannot be excluded that the list is incomplete or that two facies have roughly the same geographical origin; on the opposite, two blocks of stone with similar facies can also come from two different quarries.

P1: Oolitic grainstone

The stone presents a grain-supported fabric built by well-sorted and very fine-grained ooids (Fig. 9, P1, B, 1). Some blocks show stratification. This facies appears yellow and its altered color is yellowish-grey.

P2: Bioclastic grainstone

This facies shows grain-supported fabric composed of small calcitic bioclasts. Those fragments are tubular and some sections of crinoids (Fig. 9, P2, B, 2) have been observed; their size varies from 0.2 to 1 mm.

P3: Coarse-grained sandstone

This poorly-sorted detrital rock shows millimetric to centimetric limestone pebbles and centimetric gastropods shells (Fig. 9, P3, A, 3 and 4) embedded in a medium to coarse-grained sand. The color is orange to yellow but the alteration leaves orange deposits on the surface—it may indicate the presence of oxides.

P4: Sandstone

A poorly-sorted detrital sand shows angular grains of mostly quartz and few feldspars without matrix (Fig. 9, P4). The stone is massive and the grain size varies from fine to medium-grained.

P5: Travertine

A white calcareous travertine shows tubular structures, carbonates tubes formed by concretion around plant are also observed. A shard has been observed, caught in the concretion (Fig. 9, P5, A): it must be a recent freshwater deposit (less than 10 000 years, when pottery started to be produced in Greece) formed near a place with human activities.

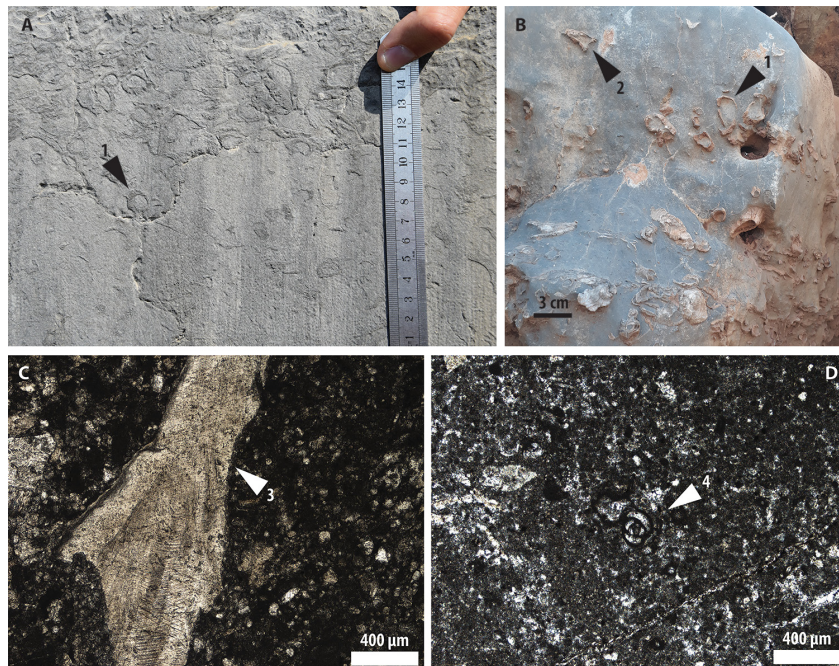


Fig. 6. Rudist limestone. A. Block of Rudist limestone (1) used in the sanctuary of Delphi. B. Outcrop of massive limestone with whole rudist shells (1) and specimen of the Hippurite family (2). C. Microscopic view showing a recrystallized fragment of rudist (3) in a micritic cement. D. Microscopic view showing a specimen of Miliolidae (4).

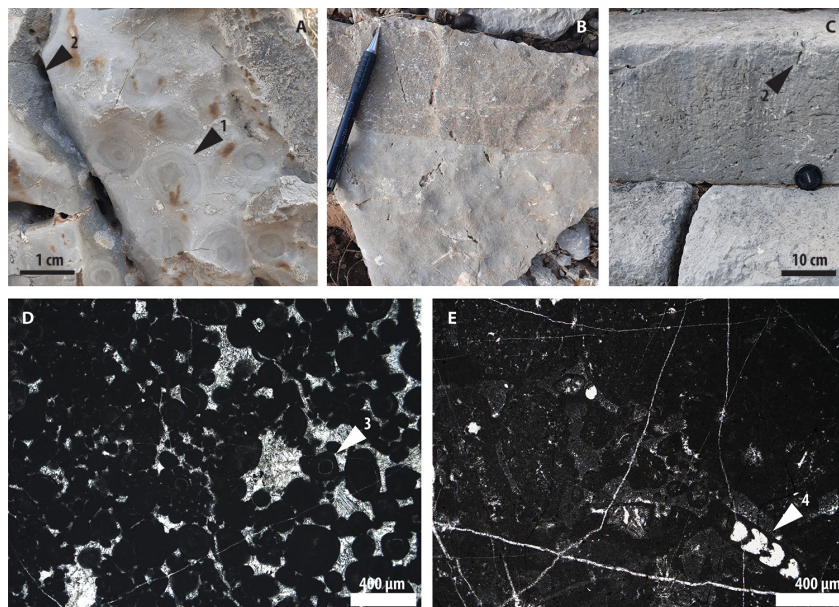


Fig. 7. Parnassus limestones. A. Outcrop observed near the Stadium Quarry showing centimetric oncoïds (1) and microkarsts (2). B. Sample observed near the Stadium Quarry showing the two subfacies observed in the Parnassus Massif. The pen is 12 cm long. C. Block of Parnassus limestone employed in the Apollo Sanctuary showing a high degree of karstification with microkarsts (2). D. Microscopic view showing a subfacies of the Parnassus limestones: an oolitic grainstone (3). E. Microscopic view of a subfacies of Parnassus limestones: a wackestone composed of pellets and biological remains in a micritic cement (4).

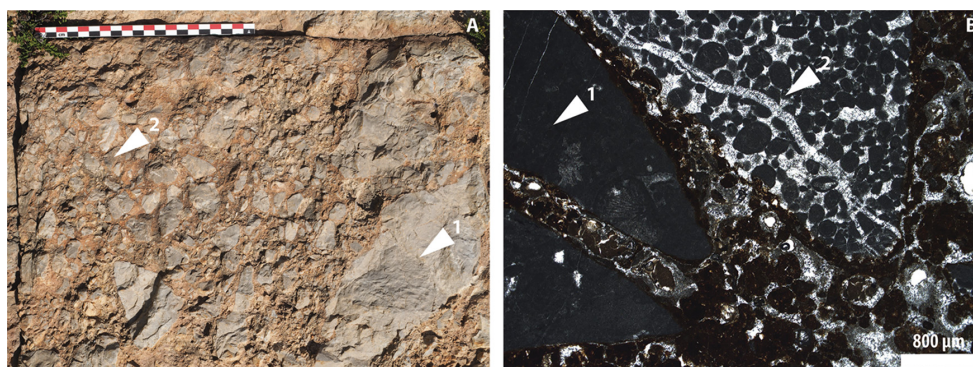


Fig. 8. Breccia. A. Block of breccia used in the Apollo Sanctuary; the clasts sizes ranges from a few centimeters to 30 centimeters; clasts of the two subfacies of the Parnassus limestones can be observed (1 for the wackestone, 2 for the oolitic grainstone). B. Microscopic view showing the limestone clasts (1 for the wackestone, 2 for the oolitic grainstone) in a clay matrix. Red, white and black rectangles on the scale represents 1 cm.

P6: Red boundstone

This red calcareous rock shows branching and tubular structures showing thin layers (Fig. 9, P6) and forming large-scale concentric laminations. This fabric is consistent with the typical characteristic of bioconstructed rock, probably build by stromatolite.

P7: Marine floatstone

This stone is composed of centimetric and intact bivalves (almost 50% of the stone) in a micritic matrix. It is easily recognizable in monuments by the numerous shells (Fig. 9, P7, A, 5 and 6). The stone is still not yet consolidated, so it did not undergo a strong burial and/or diagenesis.

3.2 Provenance of the stones

3.2.1 Local exploitation

Local stones were extracted in different ways in and around the sanctuary. In the interest of saving and practicality, the workers used the rocks directly available, mainly the Parnassus limestones. Falling blocks of the cliff show extraction marks on top of them (Fig. 10B). At the eastern extremity of the Stadium, above the Apollon Sanctuary, stairs were built directly from the Parnassus limestones outcrop. They took advantage of the geology and topography of the site.

Then, extraction tool marks have been observed east and west of the site, alongside the cliff; it suggests that the workers punctually extracted blocks from local outcrops, up to hundred meters from the site (Fig. 10A). Mesozoic limestones were extracted – the Parnassus limestones mostly, however no proof of extraction has been observed for the Rudist limestone. No large ancient quarry of Pink limestones has been located, but modern quarries have been observed in the surroundings of Delphi, near Arachova. Closer to the sanctuary, this facies outcrops on a branch of the main fault, 1500 meters eastward of the archaeological site (just before the Logari Quarry, see Fig. 3): the extraction is clear but cannot be dated yet, and the extracted volume is small.

Quarries in the region are known to have been exploited in antique times (see Fig. 3 for locations). Small quarries, a few

meters wide, that could have been used to build one or two monuments, are located directly in and all around the site. Two of them have been localized (Amandry, 1981). The first one is known as the Stadium Quarry, located just above the sanctuary, at the foot of the cliff (Fig. 10C); it seems that it was used to build the Stadium: the material match as the Stadium was built in Parnassus limestones and slope breccia. The second one is called the Logari Quarry (2 km East of Delphi), where the Mesozoic limestones from the Parnassus Massif was also exploited. Then, the biggest quarries are the Profitis Ilias quarries, where the limestones used for the Apollo Temple of the 4th century BC were extracted (Fig. 10D) (Amandry 1981; Papageorgakis and Kolaiti 1992; Zambetakis-Lekkas *et al.*, 2001; Amandry and Hansen, 2010). Located 5 km to the west of the archaeological site, the high quality of the stone can justify the required work to transport the blocs.

3.2.2 Regional exploitation

Provenance of allochthonous materials are not yet fully defined. However, the identification and characterization of seven of the so-called *póros* allow us to make assumption on their origins. One conclusion can be elicited from the petrological description of each facies: they all show a medium to high porosity, which could mean that they did not undergo strong burial, advanced diagenesis, or that they are very young formations. Recent sedimentary formations, such as the synrift ones – the marine terraces, fluvial and lacustrine deposits – exposed by the uplift of the Peloponnese, have to be prospected (see Figs. 1 and 2 for location).

Before this study, only one facies origin had been clearly identified by ancient and modern authors. In the buildings accounts of the Apollo Temple of the 4th century BC, written on limestones or marble plaques found within the Sanctuary, was written that stones from Corinth were employed for its construction (Bousquet, 1942; Roux, 1966). It corresponds to the oolitic grainstone facies used for the column drum of the actual Temple; this facies is also used in a lot of other monuments in Delphi: a hypothesis is that all this material comes from roughly the same place. The grainstone facies have been also clearly identified and observed in the archaeological site of Ancient Corinth (Fig. 11A) and

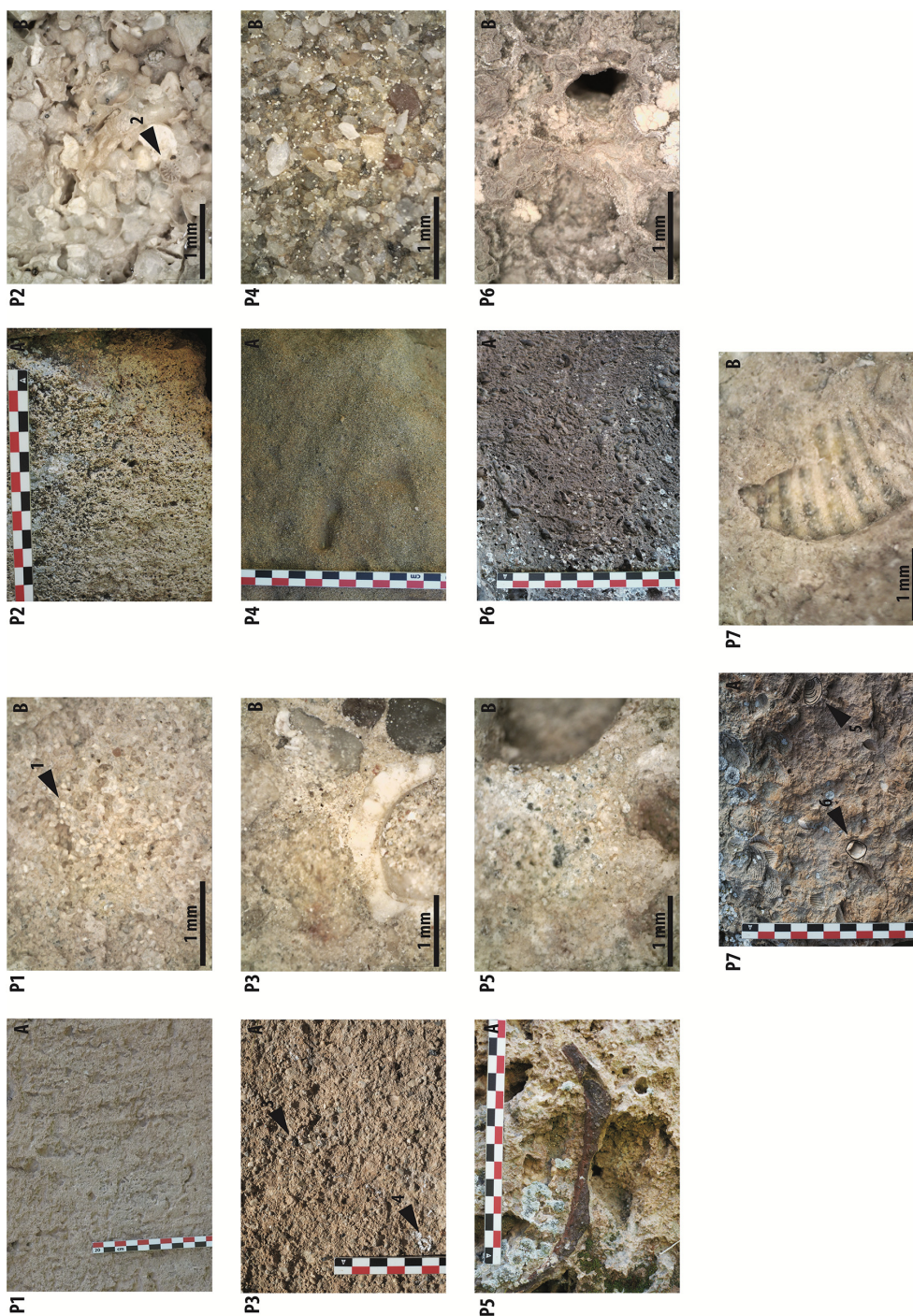


Fig. 9. Macroscopic (A) and microscopic (B) views of the different pôros observed in the archaeological site of Delphi. Microscopic views (B) were obtained with the help of the portable microscope. Red, white and black rectangles in scale is 1 cm. P1: oolitic grainstone composed of micrometric oolites (1); P2: bioclastic grainstone with section of crinoid (2); P3: coarse-grained sandstone with pebbles (3) and shell fragments (4); P4: sandstone showing angular quartz and feldspar; P5: modern travertine and its encrusted shard; P6: red boundstone; P7: marine floatstone with shells impressions (5) and bivalves shells (6).



Fig. 10. A local exploitation. A. Extraction marks observed at the top of a rock that fell of the cliff above Delphi. B. Extraction tool mark observed at the foot of the main fault, hundred meters west of the Apollo Sanctuary. C. Stadium Quarry, located just above the stadium. D. The ancient Profitis Ilias quarries, 5 km west of Delphi. E. Location of the extraction sites.



Fig. 11. Regional exploitation. A. Fountain of Glauke, at the Ancient Corinth, build directly in the oolitic dune (5 meters high); the oblique stratification can be observed; behind is standing a column of the Apollo Temple of Ancient Corinth, which is a monolith also build in oolitic dune. B. Quarry of Examilia, East of Corinth, showing extraction tool marks and known to have been exploited in antique times; the facies is similar to the one observed in the archaeological site of Ancient Corinth, the stratification is also clearly marked. See [Figure 1](#) for location.

corresponds to the lithology exploited in the Examilia quarries ([Collier and Thompson, 1991](#); [Hayward, 1996, 2003, 2013](#)) ([Fig. 11B](#)) (see [Fig. 1](#) for the location of Examilia, to the east of Corinth). In addition, a column shaft in oolitic grainstone has been found at Kirrha, the harbor of Delphi ([Fig. 1](#)). This block seems to be intended for the Apollo Temple – it shows that stones transited by sea and by land. It is well known that the region between Corinth and Sicyon exported a lot of materials to different construction sites ([Hellmann, 1999](#); [Hansen, 2000](#); [Lolos, 2002](#)).

For the other facies, only assumptions can be made. The north margin of the Corinth Gulf corresponds to a deep carbonate platform, whose limestones underwent during the alpine orogeny an advanced diagenesis; our porous facies do not match with this depositional environment. Moreover, the northern margin is actually in subsidence; in opposition to the Peloponnese, which is raising ([Armijo *et al.*, 1996](#); [Bell *et al.*, 2009](#); [Rohais and Moretti, 2017](#)). Thus, recent sedimentary deposits of the Corinth Gulf are only exposed to the west, east and south of the Gulf. The observed porous facies – the different sandstones and the marine floatstone – could come from this region. As stone trade has already been proved with the oolitic grainstone facies, other materials could be transported by ship. However, no evidence has been provided to this date; more extensive study of the sedimentary deposits must be carried out.

Finally, the only stromatolitic deposit known in the region is observed along the coast of the Perachora Peninsula, in the Isthmus of Corinth. The hypothesis is that the sedimentary facies observed in the Sanctuary of Delphi then may come from this location. Local deposits of travertine are also located in the surrounding of Pellene and Zemeni, on the southern border of the Corinth Gulf ([Gawthorpe *et al.*, 2018](#)); Pellene is located on land but it has an ancient harbor on the coast (see [Fig. 1](#) for locations of the different places mentioned).

3.3 Use

Based on the macro- and microscopical descriptions of the building materials, a lithological map of the Apollo Sanctuary

has been produced ([Fig. 12](#)). It displays the building stones remaining in place – time damages, destructions, or re-investment have impacted this snapshot, and most of the stone volume is missing, that being the main limit of the document. This map is of relatively low resolution, as only the main lithology used in each building is presented. For example, the Apollo Temple here is shown as composed only of Profitis Ilias limestone; in reality, the foundations are in slope breccia, marble and oolitic grainstone, the floor in the Profitis Ilias limestone, the columns in oolitic grainstone – showing its complex history.

All the monuments mentioned in the following description, to the exception of the Stadium that lays outside the Apollo Sanctuary, are located in the [Figure 12](#).

The Parnassus limestones corresponds to 25% of the building materials in the archaeological site: it was mainly used to build the Stadium and the Theater. These two monuments are some of the biggest in the complex, so they represent a very large volume of materials. Moreover, a few foundations of Parnassus limestones are scattered in the Sanctuary, such as the Treasury of Siphnos. Then, the Pink limestone represents the second main stone facies with a proportion of also 25%. It has been used in a lot of different circumstances: for the peribolos – the sacred enclosure of the Apollo Sanctuary –, or the polygonal wall. The Profitis Ilias limestone represents 15% of the Delphi stones and is used extensively in the Apollo Temple of the 4th century BC, the Niche of the Argos Kings, and several statue bases. Finally, the Rudist limestone facies represents 5% of the remaining stones and it was employed to build the south exterior of the peribolos and two massive statue bases.

Some lithologies are almost exclusively associated to one monument, and they correspond most of the time to the allochthonous facies. The coarse-grained sandstone (P3) is used only in the Treasury of the Beotians, and the bioclastic sandstone (P2) in the Treasury X and the so-called Bouleuterion, two monuments that had nothing in common originally. The modern travertine (P5) is observed in the foundations of the Treasury of Thebes, and the red travertine

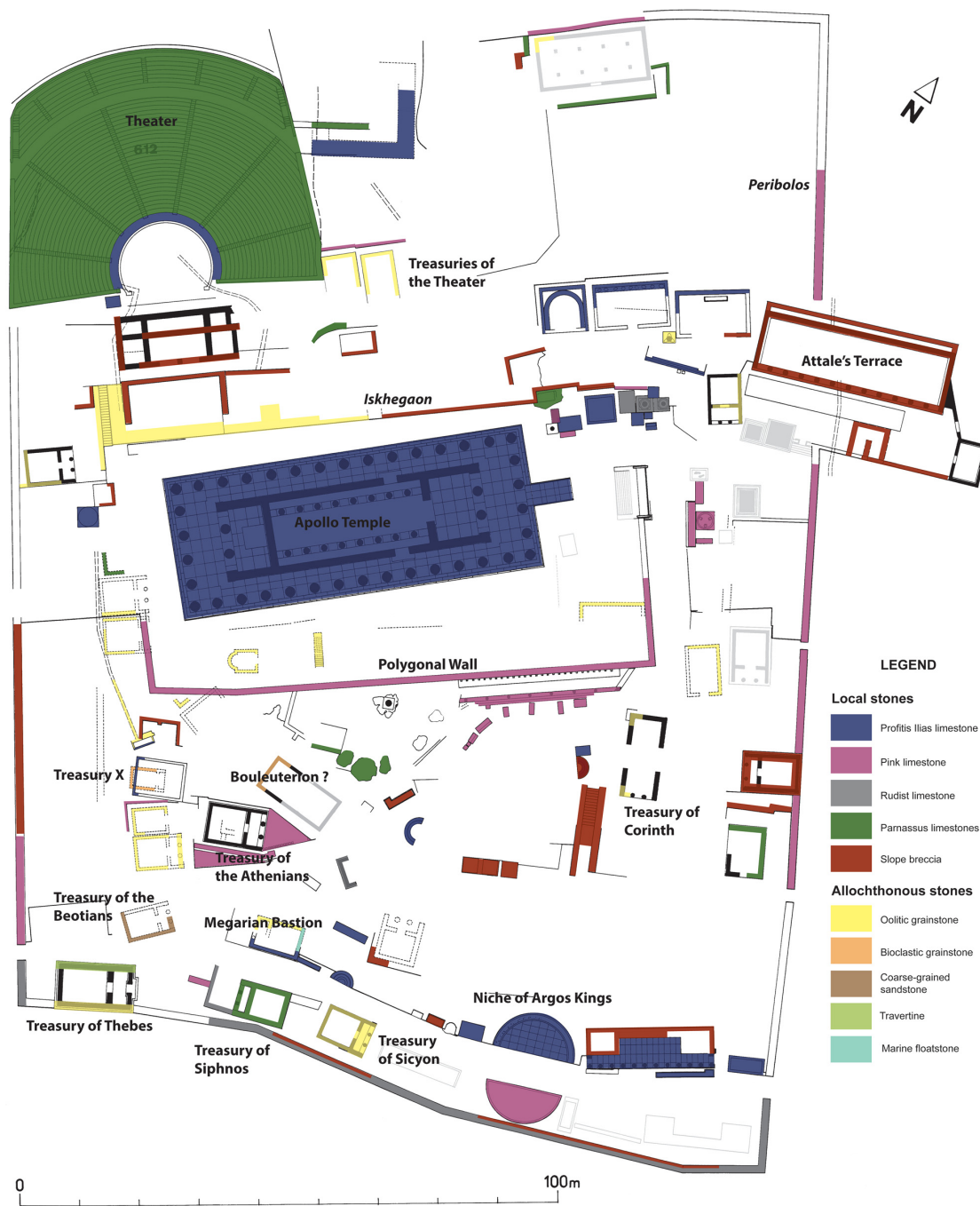


Fig. 12. Lithological map of the Apollo Sanctuary of Delphi; each color represents one of the facies described in this article, with the exception of the red boundstone which was not employed in the Apollo Sanctuary but only in the Athena Sanctuary. Base map modified from [Bommelaer and Laroche, 1991](#).

(P6) only in the Athena Sanctuary (not represented on the lithological map). Finally, the marine floatstone (P7) is observed in the Megarians Bastion (as well as some lonely blocks scattered in the sanctuary), and sandstone (P4) in the foundations of the Treasury of Sicyon, as reemployed blocks.

4 Discussion

The choice of building materials has evolved over time: the transition from wood to stone in the 7–6th centuries BC is one of the greatest achievements for monumental construction (Lawrence, 1996). But the utilization of a precise type of stones in construction is looked based on a lot of different factors that still need to be better understood. In addition, the same stone was not used the same way all through the centuries. It is well known that it evolved during times, as new quarries were discovered and open, or advanced technologies allowed transport on greater distances; but the political context and the financial situation – the social environment – also had their part in the choice of building materials. Finally, the geotechnics aspect of stones – their hardness, their capillary properties, the capacity to being polished, to resist to compression, or weathering – seemed to be known by ancient builders.

In the case of the Sanctuary of Delphi, the discussion will shortly address some of those aspects, confront the new geological data with the history of Delphi, and raise questions and hypotheses from those observations. They seem relevant for the Apollo Sanctuary as sponsors came from all Greece to build offerings and treasuries in one of the most important sanctuary at the time; one may anticipate that economic limitations were not the only factor in the choice of stone.

The oldest unknown treasuries – or *oikos* – in the Apollo Sanctuary are surprisingly built in oolitic grainstone. They correspond to the small structures cut by the polygonal wall (which was constructed at the end of the 6th century), the Treasuries of the Theater, as well as the Treasury of Corinth (see Fig. 12 for locations) (Laroche and Nenna, 1993). They are very similar to the facies used in the Apollo Temple of the 4th century BC – so they may also come from Corinth. In any case, they are not local. Only small remains of those *oikos*' foundations were conserved, and almost no information about the elevation. One hypothesis is then that the stones of Corinth were used before the 6th century BC, very early in the history of Delphi.

After the construction of the Old Apollo Temple, its destruction and the reinvestment of its building stones for the New Temple, the wall terrace above it (the *iskhegaon*), and some other monuments, during the 4th century, the oolitic grainstone facies was clearly less employed. Thus, a new trend has been noted: the use of slope breccia became more predominant, as it was not used at all, or in very small quantity, before. For example, the Attale's Terrace was built during the 2nd century BC almost entirely in slope breccia. It seems that, imported stones were first used, then local stones. It is also contradictory with the idea that the Ancient probably had to extract the slope breccia to create terraces during the 5th century BC, but its use in construction appears later.

Concerning the geotechnical aspect, the density is a crucial characteristic for the transport but also for the construction – intuitively, one may expect lighter stones in the second floor of a building. However, in the case of the limestones in Delphi,

they have all a very similar density – between 2.65 and 2.68 g/cm³. It seems that the choice was based on other characteristics that must be evaluated.

In general, there is no clear link between the nature of the building stone and the dedicator of the monument: the *pôros* may all come from the south border of the Corinth Gulf, but the dedicator does not. But some *pôros* were employed in just one building (e.g. the coarse-grained sandstone, P3, in the Treasury of the Beotians): the more rational explanation is that the builders have brought this specific stone for the construction, as it was the case for marbles (Martin, 1965).

Finally, the observations in the site support the hypothesis that the Profitis Ilias quarries were opened for the construction of the New Apollo Temple (Amandry, 1981). It seems that this limestone was only used in monuments build in the same time or after the beginning of the construction of the Apollo Temple (see Fig. 12 for the lithological plan of the sanctuary: the blue represents the Profitis Ilias limestone).

5 Conclusion

This study has enabled us to point out an unexpected diversity of building materials used in the Sanctuary of Delphi. In total, twelve different sedimentary facies have been described: four limestones of the Parnassus Nappe, recent slope breccia, and seven facies of so called *pôros*, that can be defined as recent porous sedimentary deposits. The recognition of the various lithologies allowed us to draw conclusions and hypotheses on their use in the archaeological site and their provenance.

The majority of the building stones were extracted locally but Delphi shows an unusual quantity of imported material (around 15%). Precise provenances are still under investigation, but the porous facies can be linked with the Pleistocene sedimentary deposits of the south-east margin of the Corinth Gulf where the same lithologies have been observed: oolitic grainstone at Corinth; stromatolites formation in Perachora; travertine in Pellene. Other criteria should be analyzed to validate or invalidate those hypotheses, using non-intrusive and portable analytical methods for example. Knowing the stones origin can be important for the restauration and conservation processes of the monuments.

The first steps of this study support the hypothesis that stones, even those that are more common and accessible than marbles, must have been chosen for precise reasons by the builders, even if the exact purpose is still unclear – the influence of the cost, the politics and the geotechnics aspects have to be evaluated.

Acknowledgments. This work was supported financially and materially by the French School at Athens and the authors gratefully acknowledge the Ephorate of Antiquities of Phokis for the authorization to work in the archaeological site. We would like to thank Sylvie Bourquin, Univ. Rennes, CNRS, Géosciences Rennes, who supervised the master work of R. Gastineau; Claire Bossennec and Yves Geraud, ENSG at Nancy, for their help with petrophysical measurements; Luigi Piccardi, Italian National Research Council; Lionel Fadin, topographer at the French School at Athens; and all the archaeologists for their support and interest in geology.

References

- Amandry P. 1981. Chronique delphique. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 105(2): 673–769.
- Amandry P, Hansen E. 2010. Topographie et architecture. Le temple d'Apollon du IV^e siècle. de Boccard, Paris: Fouilles de Delphes.
- Antonelli F, Lazzarini L. 2015. An updated petrographic and isotopic reference database for white marbles used in antiquity. *Rendiconti Lincei* 26(4): 399–413.
- Armijo R, Meyer B, King GCP, Rigo A, Papanastassiou D. 1996. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophysical Journal International* 126(1): 11–53.
- Attanasio D, Armiento G, Brilli M, Emanuele MC, Platania R, Turi B. 2000. Multi-method marble provenance determinations: The Carrara Marbles as a case study for the combined use of isotopic, electron spin resonance and petrographic data. *Archaeometry* 42(2): 257–272.
- Bell RE, McNeill LC, Bull JM, Henstock TJ, Collier REL, Leeder MR. 2009. Fault architecture, basin structure and evolution of the Gulf of Corinth Rift, central Greece. *Basin Research* 21(6): 824–855.
- Bolli HM. 1951. The genus *Globotruncana* in Trinidad. *Journal of Paleontology* 25(2): 187–199.
- Bommelaer J-F, Laroche D. 1991. Guide de Delphes. Le Site, 1st ed. École Française d'Athènes, Sites et monuments, 278 p.
- Bommelaer J-F, Laroche D. 2016. Guide de Delphes. Le Site, 2nd ed. École Française d'Athènes, Sites et monuments, 332 p.
- Bouleugon V. 2016. Characteristics and distributions of microbialites in the Gulf of Corinth, Greece. Master thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 52 p.
- Bousquet J. 1942. Delphes. Comptes du IV^e siècle. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 66(1): 84–123.
- Brun J-P, Sokoutis D. 2007. Kinematics of the Southern Rhodope Core Complex (North Greece). *International Journal of Earth Sciences* 96(6): 1079–1099.
- Carras N. 1995. The carbonate plate-form of the Parnassus during the Late Jurassic – Early Cretaceous: Stratigraphy and evolution of the Paleogeography. Thesis, University of Athens, 232 p.
- Collier REL, Thompson J. 1991. Transverse and linear dunes in an Upper Pleistocene marine sequence, Corinth Basin, Greece. *Sedimentology* 38(6): 1021–1040.
- Cushman J-A. 1926. Some foraminifera from the Mendez shale of Eastern Mexico. *Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research* 2(1): 16–24.
- Dalbiez F. 1955. The genus *Globotruncana* in Tunisia. *Micropaleontology* 1(2): 161–171.
- de La Coste-Messelière P. 1969. Topographie de Delphes. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 93(2): 730–758.
- Dercourt J, Zonenshain LP, Ricou L-E, Kazmin VG, Le Pichon X, Knipper AL, *et al.* 1986. Geological evolution of the tethys belt from the atlantic to the pamirs since the Lias. *Tectonophysics* 123: 241–315.
- Déroche V, Mandi V, Maniatis Y, Nikolaou A. 1989. Identification de marbres antiques à Delphes. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 113(1): 403–416.
- Doutsos T, Koukouvelas IK, Xypolias P. 2006. A new orogenic model for the External Hellenides. *Geological Society, London, Special Publications* 260(1): 507–520.
- Fleury J-J. 1980. Les Zones de Gavrovo-Tripolitza et du Pinde-Olonos: Grèce Continentale et Péloponnèse du Nord. Évolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre Alpin. Thesis, Lille 1.
- Ford M, Rohais S, Williams EA, Bourlange S, Jousselin D, Backert N, *et al.* 2013. Tectono-sedimentary evolution of the western Corinth rift (Central Greece). *Basin Research* 25(1): 3–25.
- Ford M, Hemelsdaël R, Mancini M, Palyvos N. 2017. Rift migration and lateral propagation: evolution of normal faults and sediment-routing systems of the western Corinth rift (Greece). *Geological Society, London, Special Publications* 439(1): 131–168.
- Gawthorpe RL, Leeder MR, Kranis H, Skourtsos E, Andrews JE, Henstra GA, *et al.* 2018. Tectono-sedimentary evolution of the Plio-Pleistocene Corinth rift, Greece. *Basin Research* 30(3): 448–479.
- Gielisch H. 1993. Lagoonal to tidal carbonate sequences of Upper Jurassic/Lower Cretaceous age in the Corinthian area: Melange blocks of the Parnassus zone. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 28(3): 662–676.
- Gregou S, Solakios N, Pomoni-Papaioannou F. 1994. The carbonate-flysch transition (late Maastrichtian-late Palaeocene) in the Arachova sequence of the Parnassus-Ghiona Zone, central Greece. *Geological Magazine* 131(6): 819–836.
- Hansen. 2000. Delphes et le travail de la pierre. In: Jacquemim A, ed. *Delphes cent ans après la Grande Fouille. Essai de bilan. Actes du colloque organisé par l'EFA, 17–20 septembre, 1992*, pp. 201–213.
- Hayward CL. 1996. High-resolution provenance determination of construction-stone: A preliminary study of Corinthian oolitic limestone quarries at Examilia. *Geoarchaeology* 11(3): 215–234.
- Hayward CL. 2003. The geology of Corinth: Study of a basic resource. In: Williams CK, Bookidis N, eds. *Corinth XX. The Centenary, 1896–1996*, Athens, pp. 15–42.
- Hayward CL. 2013. Corinthian stone exploitation and the interpretation of inscribed building accounts. In: Kissas K, Niemeier WD, eds. *The Corinthia and the Northeast Peloponnesus: Topography and history from Prehistoric times until the end of Antiquity*. München: Hirmer Verlag, pp. 63–78.
- Hellmann M-C. 1999. Choix d'inscriptions architecturales grecques, traduites et commentées. MOM, Lyon: Travaux de la Maison de l'Orient Méditerranéen, 132 p.
- Jacquemin A. 2000. Les Offrandes Monumentales à Delphes. De Boccard, BEFAR, 434 p.
- Jockey P, Association for the Study of Marble and Other Stones used in Antiquity & International Symposium (eds). 2011. *Leukos lithos: marbres et autres roches de la Méditerranée antique: études interdisciplinaires [Interdisciplinary Studies on Mediterranean ancient Marble and Stones]*. Editions Karthala, Maison méditerranéenne des sciences de l'homme, 998 p.
- Jolivet L, Brun J-P. 2010. Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. *International Journal of Earth Sciences* 99(1): 109–138.
- Jolivet L, Menant A, Sternai P, Rabillard A, Arbaret L, Augier R, *et al.* 2015. The geological signature of a slab tear below the Aegean. *Tectonophysics* 659: 166–182.
- Keller BM. 1946. Foraminifera of the Late Cretaceous deposits of the Sochi region. *Byulletin Moskovskogo Obschestva Ispytateley Prirody, Otdel Geologicheskii* 21: 83–108.
- Kissel C, Laj C. 1988. The Tertiary geodynamical evolution of the Aegean arc: a paleomagnetic reconstruction. *Tectonophysics* 146(1): 183–201.
- Laroche D, Nenna M-D. 1993. Études sur les trésors en poros à Delphes. *Publications de l'Institut Français d'Études Anatoliennes* 3(1): 227–245.
- Lawrence AW. 1996. Greek Architecture, 5th ed. Yale University Press, The Yale University Press Pelican History of Art Series, 264 p.
- Losos YA. 2002. A Public Column Drum from a Corinthian Quarry. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 71(2): 201–207.
- Maniatis Y, Mandi V, Nikolaou A. 1988. Provenance investigation of marbles from Delphi with ESR Spectroscopy. In: Herz N, Waelkens M, eds *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 443–452.

- Martin R. 1965. Manuel d'architecture Grecque. I: Matériaux et Techniques. Paris : A. et J. Picard, 522 p.
- Menant A, Jolivet L, Vrielynck B. 2016. Kinematic reconstructions and magmatic evolution illuminating crustal and mantle dynamics of the eastern Mediterranean region since the late Cretaceous. *Tectonophysics* 675: 103–140.
- Mettos A, Rondoyanni T, Ioakim C. 2009. Reconsideration of the structural relationship between the Parnassus-Ghiona and Vardoussia geotectonic zones in central Greece. *International Journal of Earth Sciences* 98(8): 1927–1934.
- Moretti I, Sakellariou D, Lykousis V, Micarelli L. 2003. The Gulf of Corinth: an active half graben? *Journal of Geodynamics* 36(1): 323–340.
- Morris A, Anderson M. 1996. First palaeomagnetic results from the Cycladic Massif, Greece, and their implications for Miocene extension directions and tectonic models in the Aegean. *Earth and Planetary Science Letters* 142(3): 397–408.
- Nirta G, Moratti G, Piccardi L, Montanari D, Carras N, Catanzariti R, *et al.* 2018. From obduction to continental collision: new data from Central Greece. *Geological Magazine* 155(2): 377–421.
- Nixon CW, McNeill LC, Bull JM, Bell RE, Gawthorpe RL, Henstock TJ, *et al.* 2016. Rapid spatiotemporal variations in rift structure during development of the Corinth Rift, central Greece. *Tectonics* 35(5): 1225–1248.
- Ori GG. 1989. Geologic history of the extensional basin of the Gulf of Corinth (?Miocene-Pleistocene), Greece. *Geology* 17(10): 918–921.
- Palagia O, Herz N. Investigation of marbles at Delphi. In: Herrmann N, Newman R, eds. *ASMOSIA V: Interdisciplinary Studies on Ancient Stones*. Boston: Archetype Publications, 2002, pp. 240–249.
- Papageorgakis J, Kolaïti E. 1992. The ancient limestone quarries of Profitis Elias near Delphi (Greece). In: Waelkens M, Herz N, Moens L, eds. *Ancient stones: Quarrying, trade and provenance. Interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and near East from the Prehistoric to the Early Christian Period*. Leuven University Press, pp. 37–39.
- Papanikolaou DJ, Royden LH. 2007. Disruption of the Hellenic arc: Late Miocene extensional detachment faults and steep Pliocene-Quaternary normal faults – Or what happened at Corinth? *Tectonics* 26(5).
- Perrier A. 2019. La réorganisation de l'espace du sanctuaire d'Apollon à Delphes au IV^e siècle av. J.-C. In: Montel S, Pollini A, eds. *La question de l'espace Au IV^e siècle avant J.-C. dans les mondes grec et étrusco-italique: continuités, ruptures, reprises*. Presses universitaires de Franche-Comté, Institut des sciences techniques de l'Antiquité, pp. 71–91.
- Piccardi L. 2000. Active faulting at Delphi, Greece: Seismotectonic remarks and a hypothesis for the geologic environment of a myth. *Geology* 28(7): 651–654.
- Piccardi L, Monti C, Vaselli O, Tassi F, Gaki-Papanastassiou K, Papanastassiou D. 2008. Scent of a myth: tectonics, geochemistry and geomorphology at Delphi (Greece). *Journal of the Geological Society* 165(1): 5–18.
- Plummer HJ. 1927. Foraminifera of the Midway Formation in Texas. *University of Texas Bulletin* 2644: 1–206.
- Pomoni-Papaoannou F. 1994. Palaeoenvironmental reconstruction of a condensed hardground-type depositional sequence at the Cretaceous-Tertiary contact in the Parnassus-Ghiona zone, central Greece. *Sedimentary Geology* 93(1): 7–24.
- Ricou L-E. 1994. Tethys reconstructed: plates, continental fragments and their Boundaries since 260 Ma from Central America to South-eastern Asia. *Geodinamica Acta* 7(4): 169–218.
- Ricou LE, Dercourt J, Geyssant J, Grandjacquet C, Lepvrier C, Biju-Duval B. 1986. Geological constraints on the alpine evolution of the Mediterranean Tethys. *Tectonophysics* 123(1): 83–122.
- Rohais S, Moretti I. 2017. Structural and stratigraphic architecture of the Corinth Rift (Greece): an integrated onshore to offshore basin-scale synthesis. In: Roure F, Amin AA, Khomsi S, Al Garni MAM, eds. *Lithosphere dynamics and sedimentary basins of the Arabian Plate and surrounding areas*. Cham: Springer International Publishing, Frontiers in Earth Sciences, pp. 89–120.
- Rohais S, Eschard R, Ford M, Guillocheau F, Moretti I. 2007. Stratigraphic architecture of the Plio-Pleistocene infill of the Corinth rift: implications for its structural evolution. *Tectonophysics* 440: 5–28. DOI: [10.1016/j.tecto.2006.11.006](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.11.006).
- Roux G. 1966. Les Comptes du IV^e siècle et la reconstruction du Temple d'Apollon à Delphes. *Revue Archéologique* 2: 245–296.
- Royden LH, Papanikolaou DJ. 2011. Slab segmentation and late Cenozoic disruption of the Hellenic arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 12(3).
- Sengör AMC, Yilmaz Y. 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach. *Tectonophysics* 75(3): 181–241.
- Solakius N, Kati M. 2001. The palaeogeographic distribution of stromatolites in the Parnassus zone, Central Greece, during the early to middle Paleocene. *Bulletin of the Geological Society of Greece* 34(2): 779–783.
- Solakius N, Carras N, Mavridis A, Pomoni-Papaoannou F, Gregou S. 1998. Late cretaceous to early paleocene planktonic foraminiferal stratigraphy of the Agios Nikolaos sequence, the Parnassus-Ghiona zone, Central Greece. *Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας* 32(2): 13–20.
- Taylor B, Weiss JR, Goodliffe AM, Sachpazi M, Laigle M, Hirn A. 2011. The structures, stratigraphy and evolution of the Gulf of Corinth rift, Greece. *Geophysical Journal International* 185(3): 1189–1219.
- Valkaniotis S, Papanasiou G, Pavlidis S. Active faulting and earthquake-induced slope failures in archeological sites: case study of Delphi, Greece. In: Grützner C, Fernandez Steeger T, Papanikolaou I, *et al.*, eds. *Proceedings, 2nd INQUA-IGCP567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering*, 2011.
- van Hinsbergen DJJ, Hafkenscheid E, Spakman W, Meulenkamp JE, Wortel R. 2005. Nappe stacking resulting from subduction of oceanic and continental lithosphere below Greece. *Geology* 33(4): 325–328.
- Waelkens M, Herz N, Moens L. (eds). 1992. *Ancient Stones: Quarrying, trade and provenance: Interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and near East from the Prehistoric to the Early Christian Period*. Leuven University Press.
- White MP. 1928. Some index Foraminifera of the Tampico embayment area of Mexico. *Journal of Paleontology* 2(3): 177–215.
- Zambetakis-Lekkas A, Provia C, Stamatakis M, Adamopoulou V. The contribution of biostratigraphy to the identification of the origin of building stones used in the past. An example of the Delphi quarries. In: Stamatakis M, ed. *8th Euroseminar on Microscopy Applied to Buildings Materials, September 4–7, Athens, 2001*, pp. 35–42.

Cite this article as: de Vals M, Gastineau R, Perrier A, Rubi R, Moretti I. 2020. The stones of the Sanctuary of Delphi – Northern shore of the Corinth Gulf – Greece, *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 191: 11.

3.4 Le nord-est du Golfe : la Mégaride et la Béotie

3.4.1 Contexte historique et topographique

La Mégaride est une des plus petites régions de la Grèce antique, correspondant plus ou moins aux limites topographiques du bassin de Mégare (**Figure 20**). Il est encadré par des chaînes de montagnes orientées NW-SE (au nord, la prolongation du massif du Parnès, et au sud par les Monts Géraniens) et s'ouvre à l'ouest sur le Golfe de Corinthe, et à l'est sur le Golfe Saronique. La région s'étend cependant un peu plus au nord-ouest et prend en compte le golfe d'Aigosthènes. C'est un point stratégique : elle fait le lien entre la Grèce continentale et le Péloponnèse, d'où sa vocation commerçante plutôt qu'agricole avec la ville antique de Mégare. Le massif montagneux au nord la sépare de la Béotie et de l'Attique, même si la frontière antique n'est pas bien délimitée (Beck & Smith 2018).

La Béotie se situe entre l'Attique et la Phocide, entre le Golfe de Corinthe au sud, et au nord, le Golfe d'Eubée (**Figure 20**). Très montagneuse au sud, elle est délimitée au sud-est par la chaîne du Parnès jusqu'au Mont Cithéron ; le massif de l'Hélicon s'étend au sud et sud-ouest. La région est donc plutôt ouverte sur le nord et l'Eubée. Entre le VI^e et le IV^e siècle avant JC, c'est une région puissante et organisée autour de Thèbes dans la confédération béotienne (Lefèvre 2007). L'histoire de la Béotie est marquée par de nombreux conflits et en particulier ceux contre Athènes : la frontière entre les deux régions n'est pas claire et s'est déplacée en fonction des conflits (Lucas 2019).

Les régions béotienne et mégarienne sont riches en sites archéologiques, avec des sites de petite envergure, des ports fortifiés ou des forteresses, mais aussi des cités et des sanctuaires. Les sites suivants ont été étudiés, sélectionnés pour donner un aperçu global des roches mises en œuvre (**Delphes** est le site n°1) (**Figure 20**) :

- Dans le bassin de Mégare, la ville moderne de Mégare est installée sur la ville antique, mais un de ses ports antiques, **Pagai** (site n°2), se situe à l'ouest du bassin, sur le Golfe de Corinthe ; plus au nord, dans la crique suivante, on trouve la forteresse d'**Aigosthènes** (site n°3).
- A la limite entre l'Attique et la Béotie, entre le Massif du Parnès et le Mont Cithéron, on trouve la forteresse d'**Éleuthères** (site n°4) installée sur un promontoire à l'extrémité ouest

de la plaine de **Mazi** (site n°5), où se situe la cité d'Oenoe. Sur le versant nord de la chaîne de montagne, se trouve la cité de **Platéés** (site n°6).

- Au sud de la Béotie, entre l'Hélicon et la côte du Golfe, on trouve les ports fortifiés de la ville de Thespies, **Kreusis** (site n°7) et **Siphai** (site n°8) ; plus à l'intérieur des terres, l'habitat de **Mavrovouni** (site n°9), **Thisbé** (site n°10) et **Chorsiai** (site n°11).
- En Béotie centrale, sur la plaine de Thèbes et autour du Lac Copais : la ville moderne est installée sur la ville antique de **Thèbes** (site n°12), et le **Kabirion** de Thèbes se trouve à environ 8 kilomètres à l'ouest (site n°13) ; dans le massif du Ptoion, on trouve l'acropole d'**Akraiphia** (site n°14) et le **sanctuaire d'Apollon Ptoos** (site n°15) ; au sud du lac Copais et dans le massif de l'Hélicon, se situent le **Val des Muses** (site n°16) et l'acropole d'**Aliarte** (site n°17).
- A l'ouest, on trouve la ville moderne d'**Orchoménos** avec sa forteresse (site n°18) et la ville moderne de **Livadia** avec le Temple de Zeus (site n°19).

Le contexte géologique du Golfe a été présenté, dont le bassin de Mégare et la plaine de Thèbes, en introduction (voir [1.2.2](#)). On peut le résumer de la façon suivante :

- Le bassin de Mégare présente une série sédimentaire de dépôts lacustres à fluviaux miocènes à récents, et les calcaires mésozoïques sub-pélagoniens forment les hauts topographiques ; des formations quaternaires, brèches de pente et dépôts alluviaux, recouvrent les formations antérieures.
- Pour la Béotie, la logique est similaire : les creux topographiques sont remplis par des sédiments récents, pliocènes à quaternaires ; les monts topographiques correspondent aux formations mésozoïques et éocènes (calcaires et flyschs pélagoniens) ; des formations quaternaires recouvrent les formations antérieures.

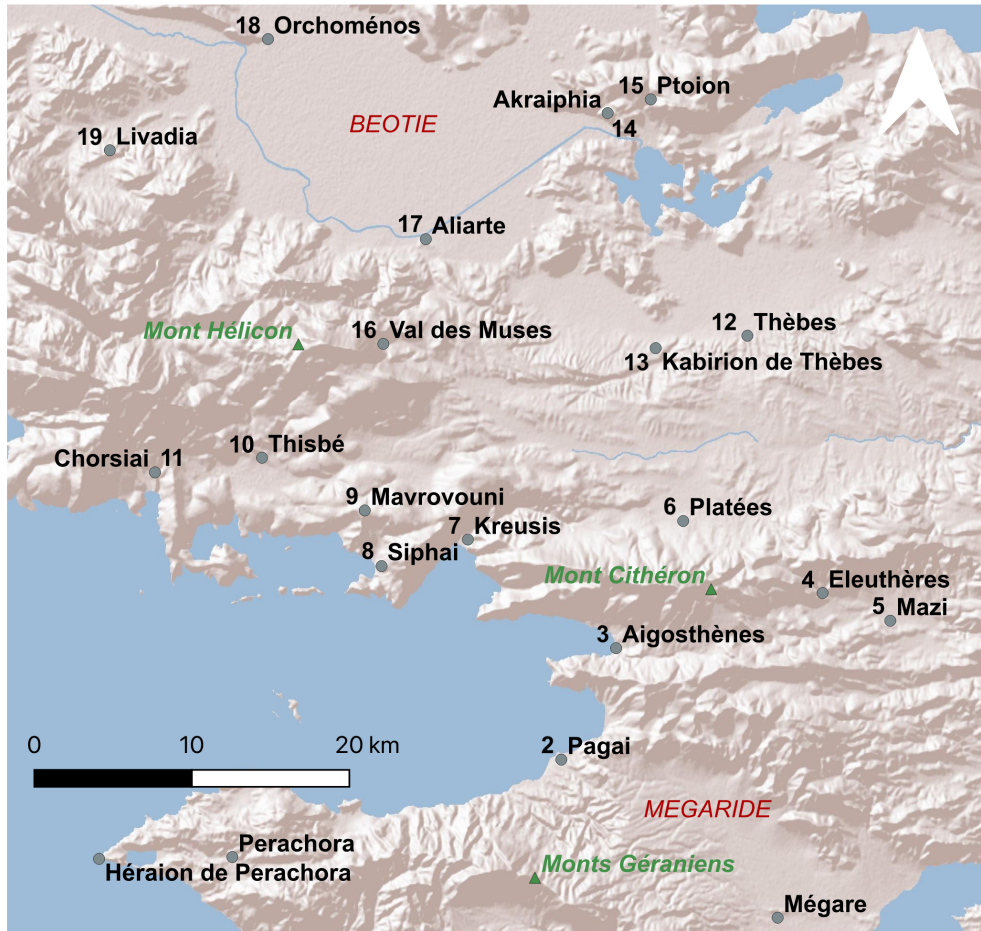


Figure 20. Carte topographique de la Mégaride et la Bœtie.

Les sites étudiés et le numéro associé, et les principaux repères topographiques sont indiqués sur la carte.

3.4.2 Description des roches mises en œuvre

- **Site 2 : Pagai (38° 5'4.42"N, 23°11'11.85"E)**

Type de vestige : On n'observe de la cité aujourd'hui qu'une acropole fortifiée (mur, tour, portes) au Ve avant JC et à l'époque hellénistique (Ober 1983; Van de Maele & Fossey 1992 ; Hansen et Nielsen, 2004). Une nécropole classique à hellénistique se situe à l'ouest ; l'agora se trouve sur un terrain privé.

État des fouilles / études : Le tracé de l'acropole a été relevé (Sakellariou & Pharaklas 1972) et le site a fait l'objet d'une mise en valeur récente, mais il n'y a pas eu de fouilles systématiques.

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique hétérogène : peu consolidé à massif, avec des clastes millimétriques à centimétriques, de *mud-supported* à *clast-supported*. Il présente une matrice grise sableuse, avec des alternances de passées riches en clastes et de passées fines avec stratifications, typiques des dépôts fluviaux. Couleur grise (**Figure 21**).
- Faciès 2 : **calcaire tendre, local**. Lumachelle : calcaire composé de bivalves entiers (séparés mais intacts) qui représentent environ 50% de la roche. Couleur blanc-jaune.

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 99% du volume de roche mis en œuvre (murs, fondations). Le faciès 2 a été employé dans la nécropole, pour les couvercles des tombes, et un bloc errant sur l'acropole a été identifié ; il correspond à un volume symbolique de 1%.

Carrières associées : Aucune carrière n'a été identifiée (non recherchée), mais le faciès 1 a été extrait sur place : l'acropole est située sur un promontoire correspondant à une ancienne terrasse marine quaternaire (Bornovas 1984). Le faciès 2 est similaire au faciès exploité dans le bassin de Mégare (Q12), d'où une provenance locale.



Figure 21. L'acropole de Pagai : les pierres mises en œuvre.

A : fondations d'une des tours de la fortification, en conglomérat polygénique fin. B : bloc du mur de fortification nord de l'acropole, en conglomérat polygénique massif grossier. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 3 : Aigosthènes (38° 8'50.60"N, 23°13'42.75"E)**

Type de vestige : De la ville antique, uniquement la citadelle fortifiée, probablement au IV^e siècle avant JC, dont 8 tours et le mur d'enceinte sont conservés, a été observée. Non observé : les murs d'enceinte qui descendent jusqu'au rivage et la ville basse.

État des fouilles / études : Fouillée en 1989-90, des travaux de restauration ont lieu depuis 2011 suite à l'effondrement d'une des tours après le séisme de 1981. Le plan du site a été relevé (Sakellariou & Pharaklas 1972; Ober 1983; Van de Maele & Fossey 1992) et les fortifications ont fait l'objet d'une thèse récente (Milioti, 2013, 2016).

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique, hétérogène, composé de clastes calcaires pluri-centimétriques, *clast-supported* à *mud-supported*, dans une matrice orange. L'altération lui donne un aspect massif, de couleur grise (**Figure 22**, B et C).
- Faciès : **calcaire tendre, régional**. Lumachelle à bivalves (50% de la roche) dans une matrice calcaire, présentant une forte porosité. Couleur jaune (**Figure 22**, D).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 100% du volume mis en œuvre. Le faciès 2 est utilisé dans une structure tardive byzantine, il n'est pas pris en compte dans l'estimation de volume.

Carrières associées : Des traces d'extraction sont visibles sur place, au sud et sud-est de la tour : le promontoire correspond à des dépôts quaternaires fluviaux de brèches et conglomérats, d'où a pu être extrait le faciès 1 (Bornovas 1984). Le faciès 2 est similaire les faciès exploités dans le bassin de Mégare ([Q12](#)).



Figure 22. La forteresse d'Aigosthènes : les roches mises en œuvre.

A : tour en conglomérat massif. B : zoom sur des blocs de fondations, en conglomérat peu consolidé. C : bloc mis en œuvre, poli : poudingue polygénique grossier. D : bloc de lumachelle, employé dans la structure byzantine. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 4 : Éleuthères (38°10'47.32"N, 23°22'31.44"E)**

Type de vestige : Ville béotienne avec une forteresse militaire, avec le mur d'enceinte, les tours et quelques bâtiments à l'intérieur, datée du IV^e siècle au I^{er} siècle avant JC. Non observés : associés à la ville, dans la plaine, un temple dorique du IV^e siècle a été retrouvé, ainsi que des basiliques et une nécropole (voir Fachard et al., 2020 et les références citées à l'intérieur).

État de fouilles / études : Prospections réalisées dans le cadre du *The Mazi Archaeological Project* (2014-2017) (Papangeli et al., 2018), mais il n'y a pas eu de fouilles sur l'acropole même.

Nombre de faciès employés : **2 faciès en place**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local.** Calcaire massif, type *mudstone*, légèrement karstique. Couleur grise (**Figure 23**, A).

- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Brèche monogénique, *clast-supported*, composée de clastes de calcaire pluri-centimétriques (graviers, jusqu'à 10 centimètres). Couleur orange mais qui se recouvre d'une patine grise (**Figure 23**, B et C).

Utilisation des pierres : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 95% du volume mis en œuvre (mur, tours, bâtiments). Le faciès 2 représente 5%, employé pour le parement extérieur du mur d'enceinte sud uniquement.

Carrières associées : La découpe du substrat pour installer la muraille a pu servir comme source de matériau du faciès 1 : le site se trouve sur un promontoire de calcaire du Trias (Dounas 1971). Le faciès 2 n'est pas présent sur le promontoire même : Fachard et al., 2013, 2020 identifient plusieurs sources de conglomérats à moins d'un kilomètre d'Éleuthères (remplissage quaternaire de la plaine).

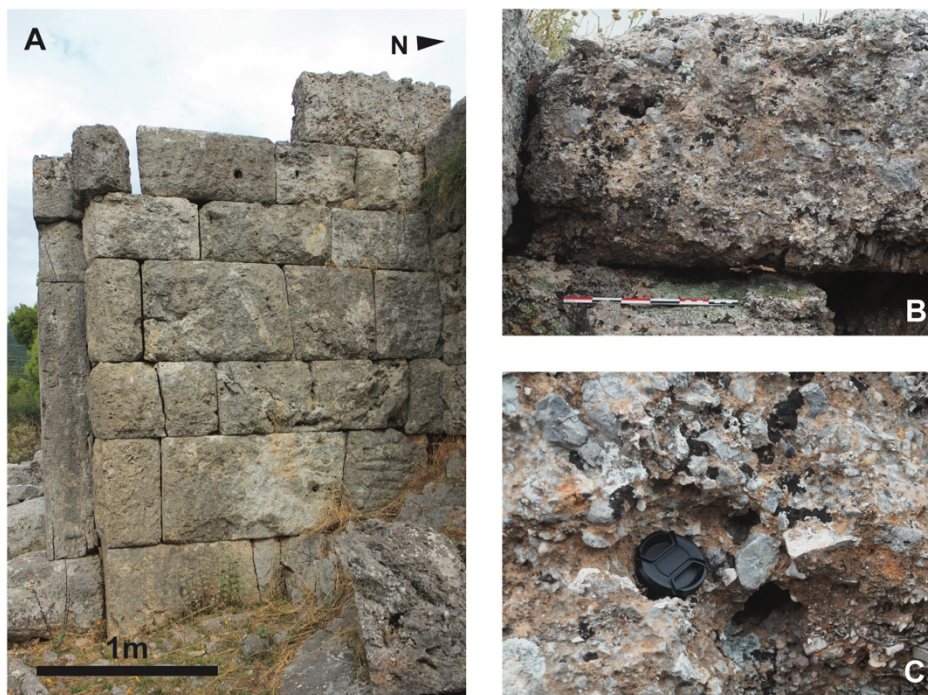


Figure 23. La forteresse d'Éleuthères : les pierres mises en œuvre.

A : vue de la fortification, porte ouest, construite avec le calcaire local et qui repose directement sur le substrat. B : bloc de conglomérat employé pour le parement extérieur du mur d'enceinte sud. L'échelle fait 30 cm au total. C : zoom sur la brèche calcaire (mur d'enceinte sud). Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 5 : Mazi (38° 9'48.88"N, 23°25'28.96"E)**

Type de vestige : Tour du IV^e siècle avant JC, athénienne ou béotienne. Non observés : les autres vestiges dans la plaine associés au dème d'Oinoe (tours et murs d'enceinte, fortifié au Ve siècle avant JC par les Athéniens), mais dont la construction est similaire à celle de Mazi d'après la littérature (Camp 1991).

État de fouilles / études : Prospections réalisées dans la plaine, dans le cadre du *The Mazi Archaeological Project* (2014-2017) (Papangeli et al., 2018).

Nombre de faciès employés : **2 faciès en place**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local.** Calcaire type *mudstone*, massif. Couleur grise (**Figure 24**).
- **Faciès 2 : conglomérat, local.** Brèche monogénique composée de clastes calcaires dans une matrice argileuse, de type *mud-supported*, peu classée (graviers à galets pluricentimétriques) avec stratification, typique des dépôts fluviaux. Couleur orange mais une patine grise lui donne un aspect massif (**Figure 24**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 5% du volume de roche, et est employé pour les premières assises - le socle - de la tour (2 à 4 assises) alors que le reste est dans le faciès 2 (95% du volume).

Carrières associées : Il n'y a pas de traces d'extraction sur place, mais l'origine locale des roches est fortement suggérée par des affleurements de calcaires similaires, environ 100 mètres au sud, au bord de la plaine (calcaires triassiques). Le faciès 2 peut correspondre aux dépôts alluviaux et de torrents qui remplissent la plaine d'Oinoe (Dounas 1971).



Figure 24. La tour de Mazi : les pierres mises en œuvre.

L'élévation est en conglomérat à partir de la 4^e assise, qui marque aussi un changement de module (forme, taille et proportion) de bloc. La tour fait 14 mètres de haut.

- **Site 6 : Platées (38°13'14.49"N, 23°16'26.19"E)**

Type de vestige : De la cité de Platées, uniquement les murs d'enceintes de l'acropole, qui datent des périodes classique et hellénistique, ont été observés. Non observés : un temple fouillé au XIX^e siècle que l'on ne peut plus aujourd'hui localiser (Waldstein et Washington, 1891) et le théâtre (visible dans la topographie uniquement).

États des fouilles / études : Le site a fait l'objet de prospections géophysiques récentes sur l'agora et quelques sondages ont été réalisés sur l'enceinte, pour la publication d'une synthèse (Konecny *et al.* 2013).

Nombre de faciès employés : 1 faciès en place + 1 faciès dans la littérature = **2 faciès au total**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : conglomérat, local.** Brèche monogénique composée de clastes anguleux de calcaires pluri-centimétriques, karstifiés, dans une matrice argileuse orange. Couleur grise (**Figure 25**, B et C).

- Faciès 2 (?) : « pôros » (Waldstein & Washington 1891).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 100% du volume de pierres mis en œuvre et encore visible. Le faciès 2 aurait été utilisé dans le temple : (Waldstein & Washington 1891) décrivent un « pôros », « *this is a very soft, nearly white, friable, finely grained limestone, apparently deposited from water, and resembling some of the Roman travertine* ». Plus loin, ils avancent que « *this poros probably comes from a ridge, which runs down to the north from Mt. Kithairon, about 1 mile east of the plateau* ». Cela ressemble à un travertin, mais le temple n'étant aujourd'hui plus accessible, cela ne peut être prouvé.

Carrières associées : Il n'y a pas de carrière identifiée, mais le faciès 1 provient directement du substrat, la plateforme sur laquelle le site est installé correspondant à une formation quaternaire d'éboulis consolidés (Dounas 1971).

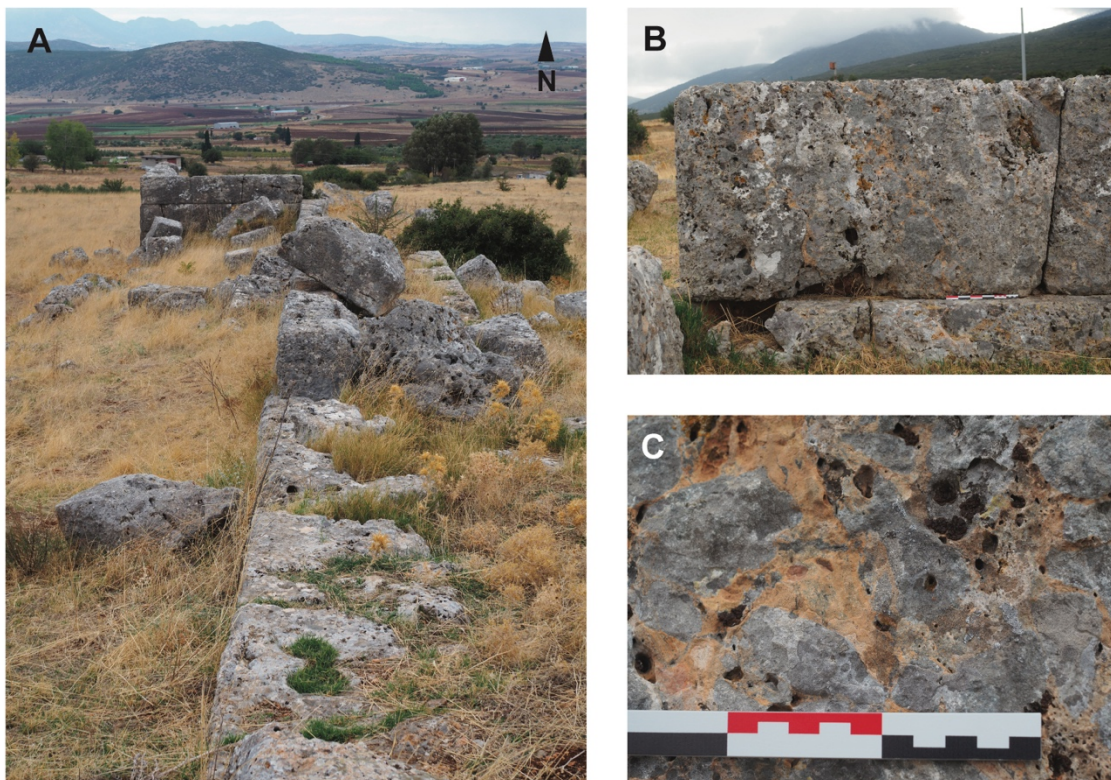


Figure 25. L'acropole de Platées : les pierres mises en œuvre.

A : vue du mur de fortification ouest, en conglomérat. B : bloc de conglomérat mis en œuvre : la patine grise lui donne un aspect massif. L'échelle fait 30 cm au total. C : zoom sur le conglomérat, avec clastes anguleux pluri-centimétriques dans une matrice orange.

- **Site 7 : Kreusis (38°12'28.48"N, 23° 6'37.26"E)**

Type de vestige : Uniquement des murs de fortification de l'acropole de Kreusis, un port fortifié de la ville de Thespies, ont été observés.

États des fouilles / études : Un relevé topographique des vestiges a été réalisé (Roesch & Argoud 1985) mais aucune fouille n'a eu lieu ; le site fait partie d'un ensemble de sites fortifiés dans la région (Fossey 1990).

Nombre de faciès employés : 1 faciès en place + 1 non en place isolé = **2 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Brèche monogénique, *clast-supported*, très cohésive, composée de clastes calcaires pluri- à déca-centimétriques dans une matrice calcaire. Couleur grise, parfois orange (**Figure 26**, B et D).
- Faciès 2 : **calcaire tendre, allochtone**. Non en place : un bloc de lumachelle, composés de bivalves centimétriques représentant plus de 50% des éléments, dans une matrice calcaire. Couleur jaune (**Figure 26**, C).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 100% du volume de roche mis en œuvre et visible en place. Le faciès 2 a été observé non en place (base ou chapiteau) et n'est pas associé à un monument : il représente un volume symbolique de 1%.

Carrières associées : Des carrières sont visibles à l'arrière du site (voir [Q9](#)) et ont fourni le faciès 1. Le faciès 2 ressemble au calcaire extrait dans la région de Mégare ([Q12](#)).



Figure 26. Le port de Kreusis : les pierres mises en œuvre.

A : vue de la fortification sud, en brèche. B : traces d'extraction (coins) sur le substrat à l'arrière de l'enceinte, à l'ouest. C : bloc de lumachelle à bivalves, base ou chapiteau de colonne, non en place. D : bloc de la muraille non en place, en brèche. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 8 : Siphai (38°11'23.19"N, 23° 3'7.68"E)**

Type de vestige : Les murs de fortification du IV^e siècle avant JC et sept tours carrées sont conservés sur l'acropole de l'ancienne Siphai, cité et port fortifié associé à la cité de Thespies (Hansen et Nielsen, 2004).

États des fouilles / études : La forteresse été étudiée par Schwandner (1977, non consulté).

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local.** Calcaire massif, présentant des joints stylolithiques et veines de calcite, daté du Trias-Jurassique (Bornovas 1984) (**Figure 27, B**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 100% du volume de pierre mis en œuvre.

Carrières associées : Des traces d'extraction ont été observées sur le site (**Figure 27, C**) : l'installation des fortifications et le terrassement a pu fournir le faciès 1.

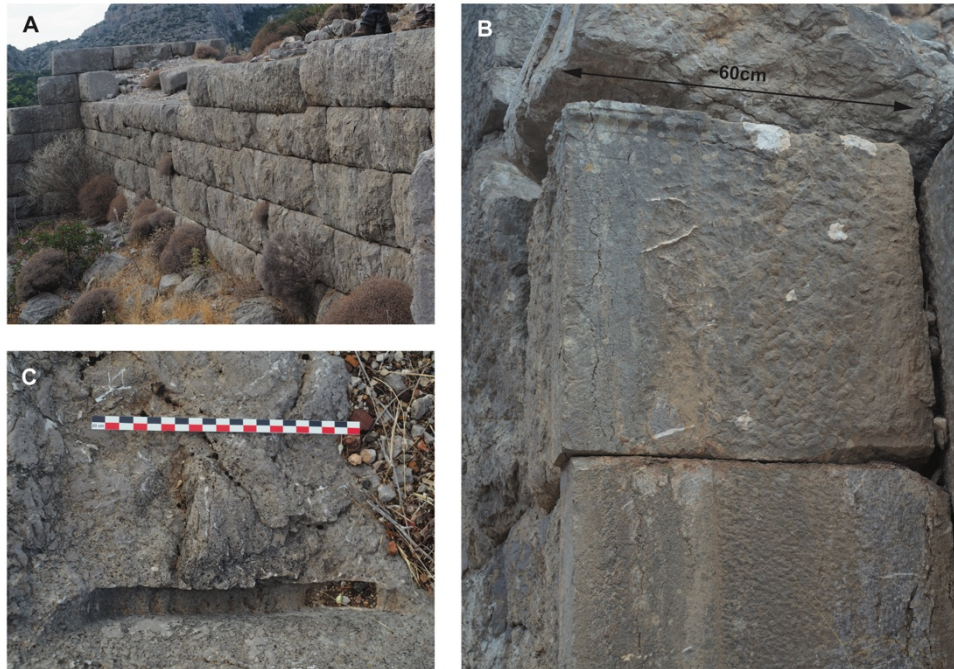


Figure 27. L'acropole fortifiée de Siphai : les pierres mises en œuvre.
A : muraille ouest de l'acropole, en calcaire dur. B : zoom sur les blocs de calcaire mis en œuvre, avec les veines de calcite et les joints stylolithiques verticaux. C : trace d'extraction sur l'acropole.

- **Site 9 : Mavrovouni (38°13'34.42"N, 23° 2'40.52"E)**

Type de vestige : Le site de Mavrovouni est un sanctuaire religieux rural, actif des temps géométriques jusqu'au IV^e siècle avant JC, où une tour classique est conservée, des bâtiments avec terrasse, et les fondations d'un temple du Ve siècle (?) avant JC et son péribole (mur d'enceinte sacré). Il ne reste cependant rien de l'élévation, sauf des blocs errants.

État des fouilles / études : Une étude extensive en particulier est publiée (Tomlinson & Fossey 1970) mais n'a jamais fait l'objet de fouilles.

Nombre de faciès employés : 1 faciès en place + 1 faciès non en place + 2 faciès non en place isolés + 1 dans la bibliographie = **5 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Calcaires massifs, avec de larges veines de calcite, de couleur grise, beige à jaune, que l'on peut dater du Trias-Jurassique (Bornovas 1984) (**Figure 28, A**).
- Faciès 2 : **grès, allochtone**. Non en place : calcaire oolithique, homogène (bien trié, fin) avec une forte porosité. Couleur jaune (**Figure 28, B**)
- Faciès 3 : **grès, régional (?)**. Isolé : faciès détritique grossier, mal classé, hétérogène : composé de 10% de clastes milli- à centimétriques de calcaires, radiolarites, grès, dans une matrice sableuse fine, avec de traces de racines et de larges pores. Couleur : jaune (**Figure 28, C**).
- Faciès 4 : **grès, régional (?)**. Isolé : faciès détritique grossier, bien trié, composé de grains sub-ronds hétérogènes (calcaires, quartz, radiolarite, autres) jusqu'à 2 millimètres. Couleur : jaune – orangée (**Figure 28, D**).
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche. Non observé.
- Faciès 6 (?) : calcaires allochtones de la plaine (Leuctres ou Domvrain) (Tomlinson & Fossey 1970).

Utilisation : Il y a une grande différence entre le nombre de faciès en place et le nombre de faciès observés dans les blocs errants : les estimations volumétriques ne prennent en compte que les vestiges en place. Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 est majoritaire et correspond à 93% du volume de roche mis en œuvre (tour, fondations des habitations et du péribole). On peut estimer à 5% l'utilisation du faciès 2, s'il correspond bien à l'élévation du temple (morceaux de colonnes errants retrouvés sur le site). Les faciès 3 et 4 ne peuvent pas être estimés, car ils ne sont pas associés à un monument (1% et 1%). Le faciès 5 n'est pas observé, et correspond à des fragments de statues en marbre (McCredie & Steinberg 1960; Tomlinson & Fossey 1970) (1%).

Carrières associées : Il n'y a pas de carrières associées, mais des traces d'extraction aux alentours ont été identifiées (Tomlinson & Fossey 1970). De plus, les auteurs indiquent que des calcaires durs viennent de deux carrières dans les environs : Domvrain (près de Thisbé) et Parapounyia (près de Leuctres), qu'ils différencient du calcaire local. Cependant, il n'y a pas de preuves explicites pour avancer ces hypothèses, et les carrières se trouveraient respectivement à 6 et 12 kilomètres, avec un dénivelé de plus de 300 mètres. Pour le faciès 2, il pourrait venir de la région de Corinthe ([Q16](#)). Les faciès 3 et 4 n'ont pas d'origines précises : ils ne sont pas locaux d'après le contexte géologique (Bornovas 1984).

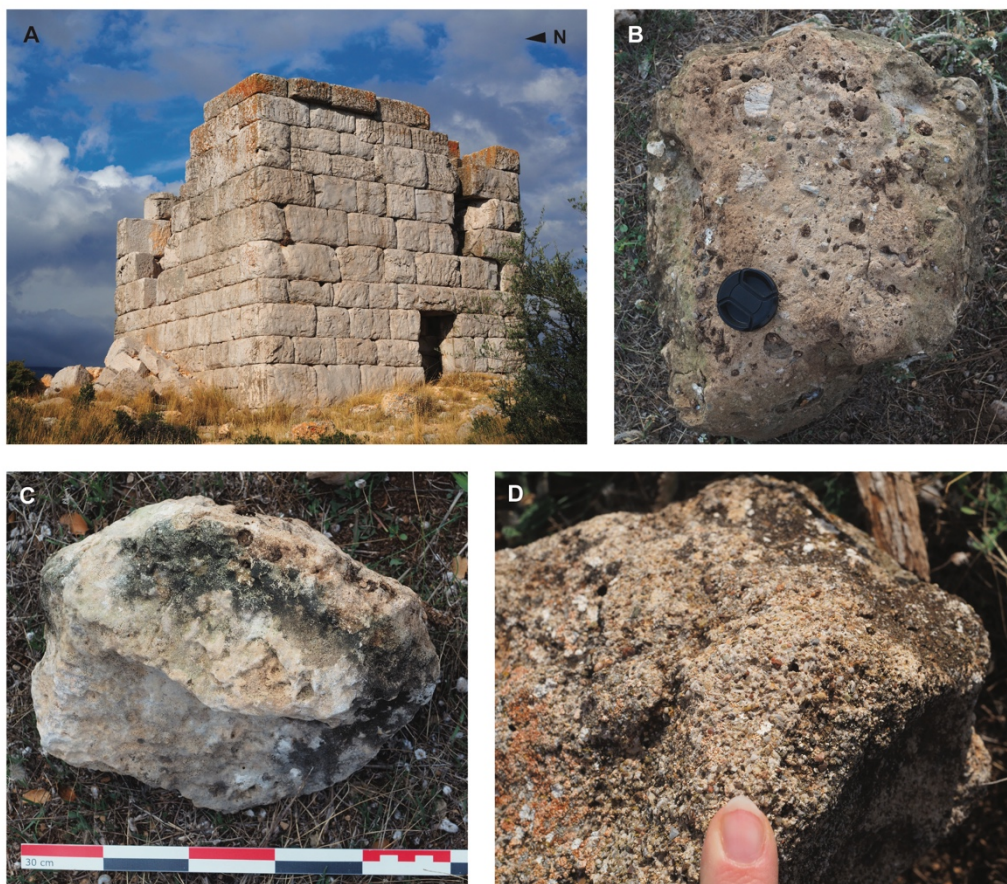


Figure 28. Le sanctuaire de Mavrovouni : les pierres mises en œuvre.

A : la tour classique, en calcaire local. B : bloc isolé dans le faciès 3, grès hétérogène détritique. C : morceau de colonne dans le faciès 2, calcaire oolithique. D : bloc isolé dans le faciès 4, grès grossier homogène. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 10 : Thisbé (38°15'22.91"N, 22°58'11.39"E)**

Type de vestige : Uniquement la muraille hellénistique de l'acropole basse de la cité de Thisbé a été observée. Non observée : la muraille de l'acropole haute (aucun vestige de bâtiments ont été retrouvés) (Fossey, 1988 ; Hansen et Nielsen, 2004).

État des fouilles / études : projet en cours (prospections, relevés, et étude environnementale) par A. Dunn (British School at Athens, BSA) et les autorités grecques.

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local.** Calcaire massif, fracturé et parcouru de veines de calcite. Couleur variable (gris, rose, jaune) mais qui se recouvre d'une patine grise (**Figure 29**, B et C).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 100% du volume de pierre employé.

Carrières associées : Il n'y a pas de carrière identifiée mais une extraction locale, directement de la plateforme, est très probable (traces de nivellement) : elle correspond à une unité de calcaires datée du Trias-Jurassique (Tataris *et al.* 1970b).

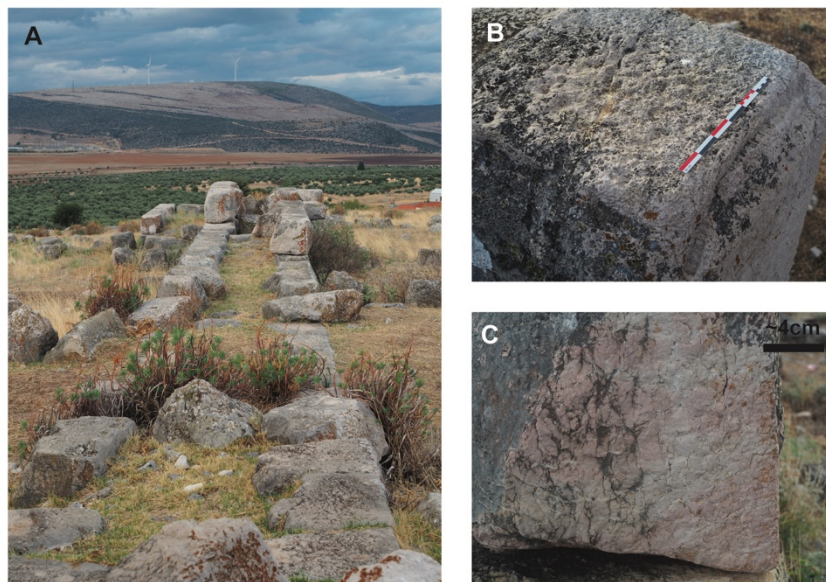


Figure 29. La ville de Thisbé : les pierres mises en œuvre.

A : muraille hellénistique sud. B : bloc de calcaire mis en œuvre, patine grise et trace d'extraction. C : surface non altérée d'un bloc en calcaire, couleur rosée avec la fracturation.

- **Site 11 : Chorsiai / Khostia (38°15'18.87"N, 22°52'58.88"E)**

Type de vestige : Les vestiges de la cité antique de Chorsiai se composent d'une forteresse avec des remparts du Ve et VIe siècles avant JC sur l'acropole, et un quartier industriel à son pied, datée de la période archaïque à hellénistique (Hansen et Nielsen, 2004).

État des fouilles / études : Le site a fait l'objet de fouilles canadiennes dans les années 80 (Fossey 1981; Fossey & Morin 1986).

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Brèche calcaire, dans une matrice calcaire, très érodée. Couleur grise (**Figure 30**, A et B).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 100% du volume en place.

Carrières associées : Une carrière et des traces d'extraction sont visibles au nord et dans le site (voir [Q8](#)).



Figure 30. La forteresse de Chorsiai : les pierres mises en œuvre.

A : mur classique en appareil isodome ou rectangulaire, brèche. B : traces de coins dans la carrière. C : tranchées d'extraction et angle dans la carrière.

- **Site 12 : Thèbes* (38°19'25.96"N, 23°19'3.10"E)**

Type de vestige : Il ne reste que très peu de vestiges de la ville antique de Thèbes (murailles et portes exhumées lors de fouilles de sauvetage) et les fondations du Temple d'Apollon Isménios (VII-VIe siècle avant JC) (Hansen et Nielsen, 2004). On trouve énormément de remplois dans les églises byzantines de la ville, et les données proviennent surtout du Musée archéologique de Thèbes (Aravanthinos, 2010).

État des fouilles / études : Depuis 2011, la colline de l’Isménion est étudiée (ASCSA / Éphorie des antiquités préhistoriques et classiques), et des fouilles de sauvetage de la Société archéologique et de l’Éphorie ont régulièrement lieu dans Thèbes.

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place** dans la ville + 1 non en place. Dans le musée, les objets proviennent de toute la région et ne sont pas comptés.

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique, composé de clastes pluricentimétriques (de calcaire, grès et autres), très hétérogène : *clast-supported* à *mud-supported*. Couleur : grise (**Figure 31**, A et B).
- Faciès 2 : **grès, origine locale (?)**. Non en place : faciès détritique conglomératique fin (clastes anguleux de calcaires, radiolarites), couleur grise-orangée (**Figure 31**, C).
- Faciès : **calcaire dur, régional**. Au Musée : calcaire noir, fin et fracturé, avec veines de calcite, qui peut être poli.
- Faciès : **grès, origine inconnue**. Au Musée : « pôros » fin blanc (**Figure 31**, D).
- Faciès : **travertin, origine inconnue**. Au Musée : tubulaire, plutôt fin, rouge. (**Figure 31**, F).
- Faciès : **marbre, régional**. Au Musée : marbre gris, grossier, dit « béotien ». (**Figure 31**, E).
- Faciès : **marbre, allochtone**. Au Musée : couleur blanche.

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, uniquement les faciès 1 et 2 sont utilisés dans la construction de la muraille, mais les vestiges sont trop épars pour pouvoir estimer des volumes. Le faciès 2 a été observé sur l’Isménion, comme blocs errants associés au Temple : bases ou chapiteaux et fûts de colonne. Les autres faciès ont été vus au Musée, mais ils ne proviennent pas toujours de Thèbes.

Carrières associées : Pas de carrières observées, mais le faciès 1 est sûrement local : la ville est installée sur des dépôts fluviaux quaternaires variés (Tataris *et al.* 1970b). Le faciès 2 pourrait être un sous-faciès plus fin du faciès 1, mais cela reste à vérifier. Pour le calcaire noir, utilisé surtout pour des stèles funéraires au Ve siècle avant JC, une hypothèse est le calcaire noir des carrières de Tanagra ([Q10](#)).

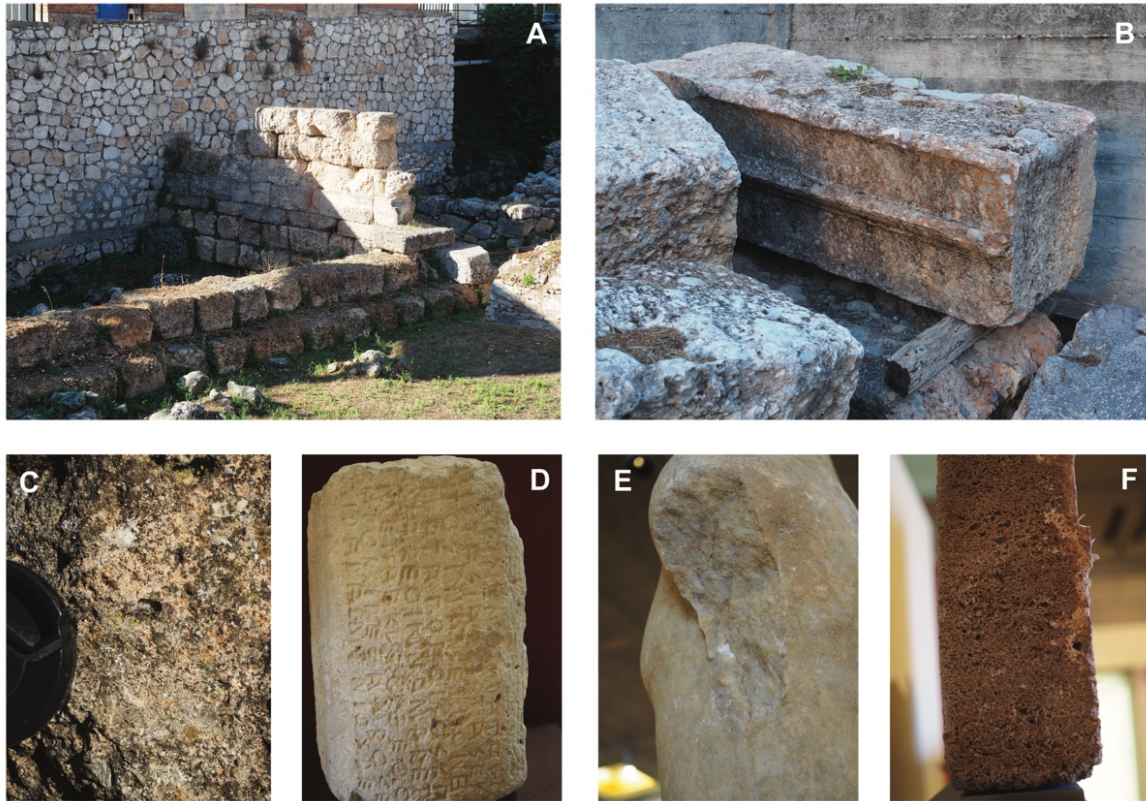


Figure 31. La ville de Thèbes : les pierres mises en œuvre.

A et B : les vestiges de remparts et monuments dans la ville, en conglomérat. C : grès conglomératique employé au Temple d'Apollon (colonne, non en place). D : colonne en « poros fin » provenant peut-être du temple d'Apollon à Thèbes, ca. 500 avant JC. E : kouros en marbre gris, dit « béotien », du Ptoion. F : stèle funéraire, IIIe – IIe siècle avant JC, Thèbes, en travertin. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre ; les objets dans le Musée n'ont pas pu être photographié avec une échelle (D : ~20cm ; E : ~30cm ; F : ~10 cm).

- **Site 13 : Kabirion de Thèbes (38°19'5.99"N, 23°15'19.00"E)**

Type de vestige : Le Kabirion est un sanctuaire des Kabires (temple et portique) où se trouve un théâtre hellénistique et romain.

États des fouilles / études : Le sanctuaire a été fouillé par l'Institut archéologique allemand (*Deutsches Archäologisches Institut* ou DAI), avec 6 volumes publiés de 1940 à 1980 sur les trouvailles et l'architecture du sanctuaire (Heyder & Mallwitz 1978).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 5 faciès non en place = **7 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Hétérogène, on observe plusieurs sous-faciès qui se différencient par la forme, taille et nature des clastes : un conglomérat polygénique *mud-supported*, avec des clastes de calcaires et radiolarites rouges, ronds à sub-ronds, centimétriques ; un conglomérat monogénique *clast-supported*, composé de clastes de calcaires gris, anguleux à ronds, centimétriques ; grès conglomératique fin, *mud-supported*, polygéniques (clastes jusque 1 cm de calcaires, argiles, grès, dans une matrice fine jaune) (**Figure 32, B et C**).
- Faciès 2 : **calcaire tendre, local**. Roche détritique peu consolidée, litée avec des alternances argileuses / calcaires, quelques clastes de calcaire et traces de racines. Couleur jaune (**Figure 32, D**).
- Faciès 3 : **grès, allochtone (?)**. Grès fin, bien trié, avec inclusions. Couleur jaune (**Figure 32, E**).
- Faciès 4 : **calcaire tendre, allochtone (?)**. Lumachelle pluri-spécifique : à turitelles et bivalves, qui représente 50% de la roche, dans une matrice calcaire fine. Les coquilles sont généralement dissoutes. Couleur blanche.
- Faciès 5 : **calcaire tendre, allochtone**. Lumachelle à bivalves, calcaire avec plus de 50% d'éléments, dans une matrice calcaire fine. Couleur blanche (**Figure 32, F**).
- Faciès 6 : **calcaire dur, local (?)**. Bloc isolé : calcaire fin, lité. Couleur marron.
- Faciès 7 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche. Bloc isolé sculpté (**Figure 32, G**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente la majorité du volume mis en œuvre (75%), en particulier pour le théâtre et les fondations. Le faciès 2 représente le reste du volume (20%), employé dans des murs et aussi des fondations. Le faciès 3 a été retrouvé non en place, pour des colonnes (1%). Les quatre autres faciès, non en place, représentent un volume symbolique de 1% chacun. Les estimations sont ici très largement biaisées : la diversité observée sur les blocs errants est supérieure à celle des vestiges en place.

Carrières associées : Il n'y a pas de carrières observées ou connues (non cherchées). Les faciès 1 et 2 semblent locaux : ils correspondent aux dépôts fluvio-lacustres des formations pléistocènes qui composent l'environnement du site archéologique (Tataris *et al.* 1970b). Le faciès 3, fin, pourrait être allochtone mais cela reste spéculatif et des formations similaires pourraient se trouver dans le bassin de Thèbes. Le faciès 5 est très similaire à celui extrait dans le bassin de Mégare (voir [Q12](#)), d'où pourrait aussi provenir le faciès 4. Le faciès 6 est un bloc isolé, de provenance sûrement locale aussi.

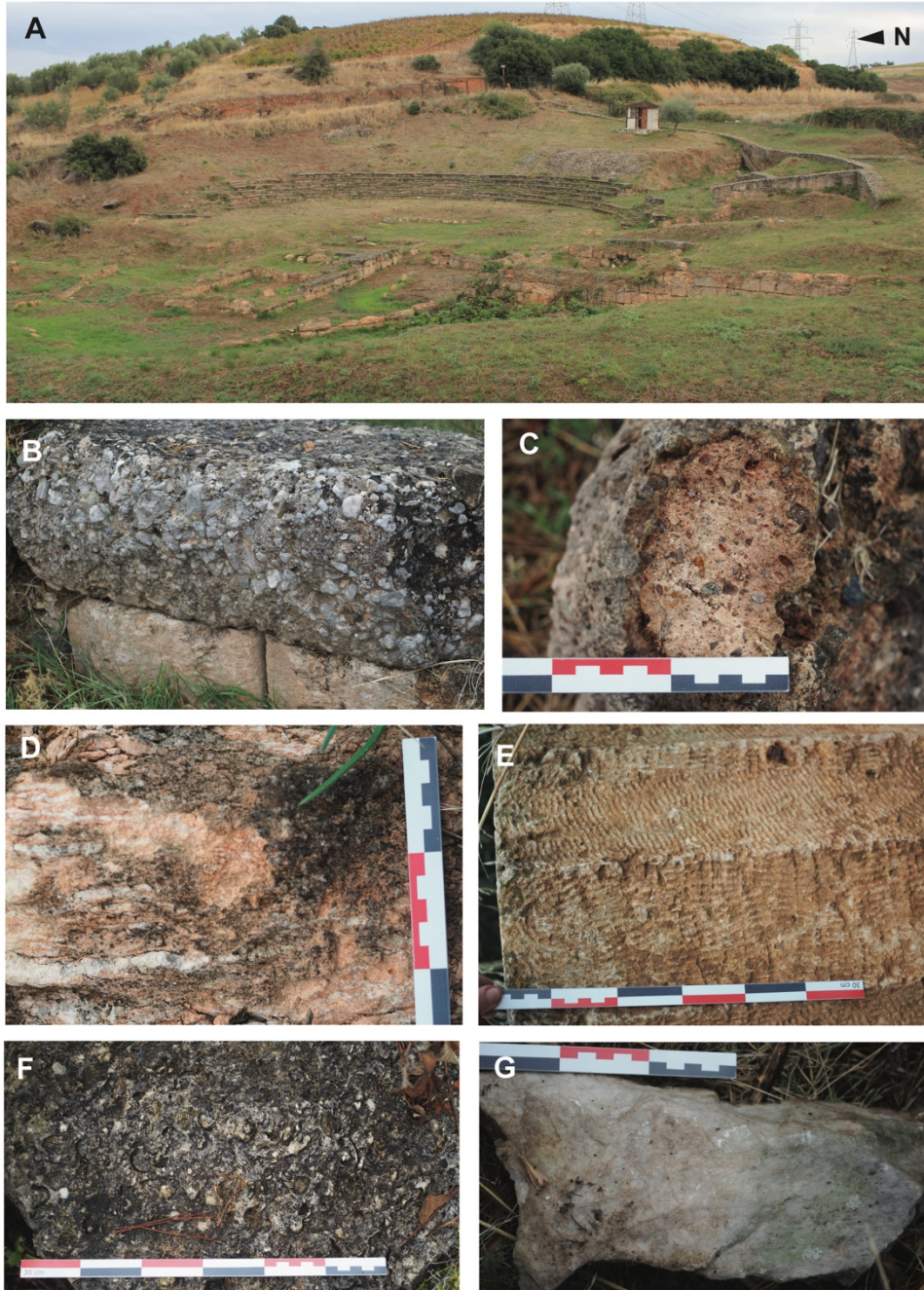


Figure 32. Le Kabirion de Thèbes : les pierres mises en œuvre.

A : le temple et le théâtre. B et C : conglomérat polygénique, grossier et très fin.
 D : calcaire tendre, roche détritique employée dans les fondations et les murs. E : grès fin utilisé pour des fûts de colonne cannelée, non en place. F : calcaire tendre, à bivalves, non en place. G : marbre blanc, non en place.

- **Site 14 : Akraiphia (38°27'4.53"N, 23°13'21.65"E)**

Type de vestige : De la cité d'Akraiphia, unique l'acropole avec murs de fortification et tours, de la période classique – hellénistique, a été observée.

État des fouilles / études : Le site, exploré par l'EFA (Müller 1995, 1996a) fait l'objet d'une étude actuelle par Th. Lucas (Lucas & Sánchez 2022).

Nombre de faciès employés : **2 faciès en place**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local.** Calcaire gris, massif, légèrement karstique, daté du Jurassique (**Figure 33, A**).
- **Faciès 2 : calcaire tendre, local.** Faciès détritique, peu consolidé, bioturbé (racines). Il est associé aux « flyschs éocènes » (Pagounis *et al.* 1988) (**Figure 33, B**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 90% du volume de roche mis en œuvre dans les murs. Le faciès 2 représente les 10% restants, employé sur certains parements extérieurs et pour deux murs peu épais.

Carrières associées : Aucune carrière observée (non recherchée), mais les deux faciès composent la colline où est construit le site, qui a pu fournir l'acropole en matériau.



Figure 33. L'acropole d'Akraiphia : les pierres mises en œuvre.

A : vue générale de la porte d'entrée est de la muraille, en calcaire local. B : vue générale d'un mur en calcaire tendre, employé à l'extérieur de la fortification (porte est).

- **Site 15 : Ptoion (38°27'33.60"N, 23°15'6.30"E)**

Type de vestige : Le sanctuaire d'Apollon Ptoos (portique, fontaine, temple) se situe à environ 3 kilomètres à l'est d'Akraiphia. Un temple du Ptoion (IVe siècle avant JC) se trouve entre les deux sites. Non observées : près du Temple du Ptoion, des bases de trépieds (objet religieux avec trois pieds, souvent en bronze) et des fondations quadrangulaires ont été identifiées mais ont aujourd'hui disparu.

États des fouilles / études : La région d'Akraiphia, dont le temple et le sanctuaire d'Apollon Ptoos, est étudiée par l'EFA (Lemerle 1935; Guillon 1943; Ducat 1971; Müller 1995, 1996a), l'étude est reprise en 2019-2021 par Ch. Müller, Th. Lucas et D. Bartzis.

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 faciès dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire tendre, local**. Faciès détritique, bioturbé, avec des passées consolidées (encroûtements), conglomératiques et d'autres plus fines. Associé aux « flyschs éocènes » (**Figure 34, A et C**).
- Faciès 2 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif, faiblement karstique, avec des veines de calcite, daté du Jurassique. Couleurs grises (**Figure 34, B**).
- Faciès 3 : **conglomérat, local**. Conglomérat brèche, monogénique et peu consolidé, composé de clastes de calcaires centimétriques et présentant un mauvais classement (**Figure 34, D**).
- Faciès 4 : **grès, allochtone (?)**. Non en place : grès conglomératique fin, bien trié, clastes pluri-millimétriques d'éléments allochtones anguleux dans une matrice fine. Couleur jaune (**Figure 34, E et F**).
- Faciès 5 : **marbre, régional**. Non en place : gris, homogène, gros grains (**Figure 34, H**).
- Faciès 6 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche (**Figure 34, G**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 67% du volume total, Ptoion et sanctuaire d'Apollon compris. Le faciès 2 représente 25% du volume : il a été employé pour le temple. Le faciès 3 seulement est très peu utilisé, pour des fondations (5%). Le faciès 4 n'a pas été observé en place et est employé pour un fut de colonne

uniquement (1%). Les faciès 5 et 6 représentent aussi un volume symbolique de 1% chacun, car ils ne semblent pas avoir été utilisés dans le bâti.

Carrières associées : Le faciès 1 provient d'une carrière locale (Q7). Les faciès 2 et 3 peuvent se trouver dans les alentours directs du site. Au contraire, le faciès 4, d'origine inconnue, est nécessairement non locale (de la région de Corinthe ?). Le « marbre béotien », de mauvaise qualité d'après les sculpteurs, proviendrait de Livadia. Le marbre blanc est allochtone et proviendrait de l'Attique et des Cyclades (statues en marbre blanc du Musée National d'Athènes : Pentélique (inv. 3443), Paros (Kouros n°20 ; Kore n°17), Naxos (Kouros n°19 ; n°10).

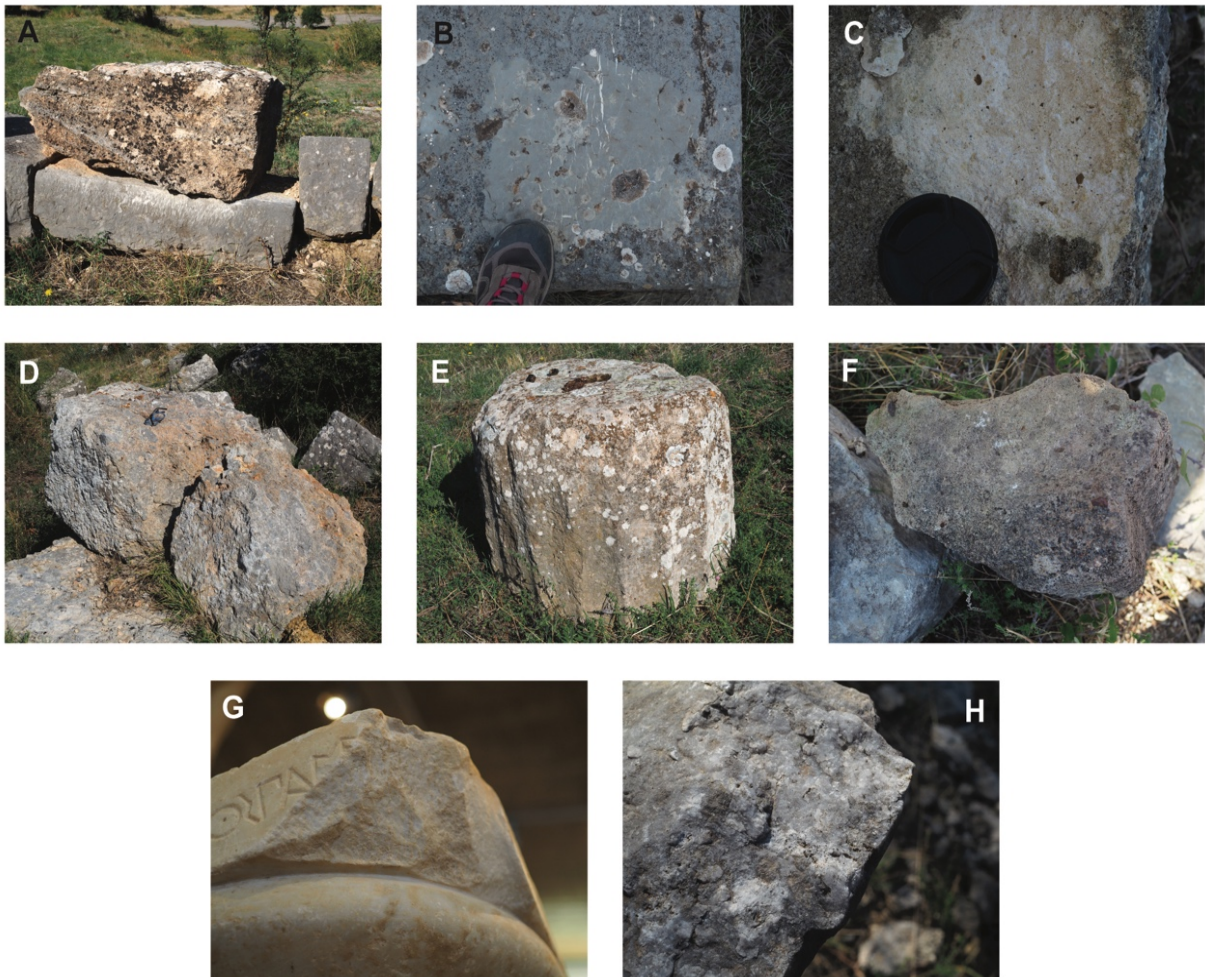


Figure 34. Le sanctuaire d'Apollon Ptoos : les pierres mises en œuvre.

A : bloc de flysch avec stratification (bioturbation, encroûtement). B : bloc en calcaire dur, gris. C : faciès fin des flysch, type grès fin. D : conglomérat. E et F : colonne et fragment de colonne en grès fin, avec clastes. G : au Musée de Thèbes, chapiteau d'une colonne votive, 550-540 avant JC, en marbre blanc. H : morceau en « marbre béotien », non en place. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 16 : Val des Muses (38°19'14.63"N, 23° 3'34.57"E)**

Type de vestige : Sanctuaire, dont il ne reste qu'un autel monumental de l'époque hellénistique, un portique ionique et un théâtre. Non observé : il n'y avait pas de temple dans le Val, mais à Thespies, un temple sur l'acropole avec « des assises en tuf » et un temple d'Apollon, dans la plaine, avec « des colonnes en tufs » ont été retrouvés (Müller 1996b).

État des fouilles / études : Les vestiges sont dégagés à la fin du XIXe siècle (de Ridder 1922) mais ils ont été très peu étudiés (Roux 1954). Récemment, l'étude du site a été reprise : en 2018 et 2019, nettoyage et sondages autour de l'autel, et dernièrement une prospection au LiDAR a eu lieu (Biard *et al.* 2017; Lucas & Sánchez 2022).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 dans la littérature = **5 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique, *clast-supported*, composé de clastes hétérogènes pluri-centimétriques (calcaires blancs à rouges) dans une matrice sableuse calcaire grise. Couleur rougeâtre (**Figure 35, B**).
- Faciès 2 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif gris à rougeâtre, bréchique par endroit, avec des stylolithes (**Figure 35, A**).
- Faciès 3 : **grès, allochtone (?)**. Non en place : grès fin, bien trié, homogène, oolithique (?). Couleur jaune (**Figure 35, C**).
- Faciès 4 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche (rares blocs, sculpture ou moulure) (**Figure 35, D**).
- Faciès 5 : « pôros » (de Ridder 1922)

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 30 % du volume de roche mis en œuvre (fondations et l'assise de réglage de l'autel, du Portique ; murs de fond du théâtre et du Portique, et latéraux du portique). Le faciès 2 représente 66 % du volume total de roche (scène du Théâtre, assises supérieures de l'autel). Les faciès 3 représente un volume estimé de 3% : d'après de Ridder (1922), il est employé pour les colonnes de la base au chapiteau. Le faciès 4 représente une valeur symbolique de 1 %. Enfin, un autre « pôros » a été décrit par de Ridder (1922), différent de celui employé pour les colonnes : utilisé en

fondations (sous le conglomérat pour l'autel et le portique), non observé car inaccessible aujourd'hui.

Carrières associées : Aucune carrière n'est associée avec le site (non recherchée), mais la provenance est sûrement locale pour les faciès 1 et 2 : au nord, des formations du Crétacé supérieur et au sud des calcaires du Trias-Jurassique moyen, affleurent (Pagounis *et al.* 1988). Cependant, on peut remarquer la ressemblance du faciès 3 avec la roche extraite dans les carrières de Corinthe (Q16).

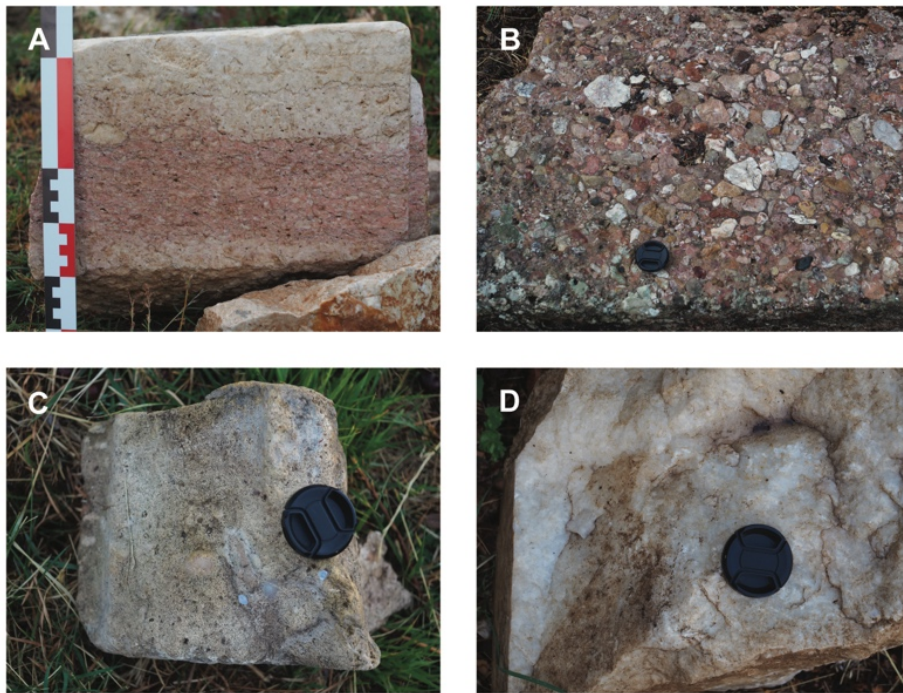


Figure 35. Le Val des Muses : les pierres mises en œuvre.

A : bloc en calcaire blanc à rouge, avec une partie bréchiue. B : bloc de conglomérat polygénique, clast-supported. C : morceau de colonne en grès. D : morceau de marbre blanc. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 17 : Aliarte (38°22'39.32"N, 23° 5'14.71"E)**

Type de vestige : La cité d'Aliarte se présente aujourd'hui comme une acropole avec une enceinte, occupée de l'époque mycénienne au Ier siècle avant JC. Les vestiges d'un temple sont aujourd'hui difficilement visibles. Non visité : le sanctuaire d'Onchestos, sur son territoire.

État des fouilles / études : fouilles de la BSA (Austin 1926, 1927, 1932).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 2 dans la littérature = **4 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif, avec des joints stylolithiques. Couleur grise à rose, il se recouvre d'une patine grise (**Figure 36, A**).
- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Brèche massive, rouge, calcaire, avec des sous-faciès plus fins (**Figure 36, B et C**).
- Faciès 3 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche (non observé).
- Faciès 4 : « pôros » (non observé). Peut-être deux types, décrit par Austin (1926).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 96% du volume mis en œuvre (murs d'enceinte) et le faciès 2 représente uniquement 3% (rares blocs dans l'enceinte). Le faciès 3 représente un volume symbolique de 1%: un seul morceau de marbre a été retrouvé (Austin 1927). Cependant, la majorité de l'élévation est manquante : des blocs de « pôros » appartiennent à la façade du Temple (morceau de colonne dorique, de mutule, d'architrave) (Austin 1932) mais n'ont pas été observés. De plus, il identifie du « pôros » employé dans des fondations ou dans des murs, mais on ne sait pas s'il est identique à celui du Temple.

Carrières associées : L'acropole se trouve sur un promontoire composé de calcaires du Crétacé supérieur, qui a pu fournir le site dans les faciès 1 et 2 (Pagounis *et al.* 1988).



Figure 36. L'acropole d'Aliarte : les pierres mises en œuvre.

A : bloc en calcaire dur, avec joints stylolithiques. B : affleurement de conglomérat, au pied de l'acropole. C : conglomérat fin employé dans un mur. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

- **Site 18 : Orchoménos (38°29'42.58"N, 22°57'33.90"E)**

Type de vestige : Seule la forteresse de la fin du IV^e siècle avant JC a été étudiée. Non observé : dans la ville, le théâtre hellénistique était en travaux en 2021 et inaccessible. On peut noter les remplois dans l'Église byzantine de Skripou (Papalexandrou, 1998, 2003).

État des fouilles / études : ce sont surtout les vestiges mycéniens qui ont été étudiés, et le théâtre (Amandry & Spyropoulos 1974).

Nombre de faciès employés : **1 faciès en place**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif et homogène, gris, légèrement karstique avec quelques fracturations, de la fin du Crétacé (Pagounis *et al.* 1988) (**Figure 37**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 100% du volume de pierre mis en œuvre.

Carrières associées : Aucune carrière n'a été observée, mais il est très probable que la roche provienne du promontoire où la forteresse est construite. Une carrière a été identifiée dans la synthèse de Kokkorou-Alevra *et al.* 2014, mais elle n'a pas été retrouvée.



Figure 37. La forteresse d'Orchoménos : les pierres mises en œuvre.
L'intégralité du site est construite en calcaire dur, qui provient directement du promontoire.

- **Site 19 : Livadia (38°25'49.16"N, 22°51'37.72"E)**

Type de vestige : Uniquement un Temple de Zeus inachevé subsiste : il ne reste rien de la ville antique, qui se trouvait à l'emplacement de la ville moderne (Turner 1994).

État des fouilles / études : Le temple a fait l'objet d'une première étude très récente (Kanellopoulos & Partida 2021).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 dans la bibliographie
= 5 faciès au total

Description des faciès :

- Faciès 1 : **marbre, local**. Grain grossier, homogène, couleur grise (**Figure 38**, A et B).
- Faciès 2 : **travertin, régional**. Concrétion calcaire, tubulaire et grossière, grise. Très peu visible (utilisé en fondation) (**Figure 38**, C).

- Faciès 3 : **grès, allochtone (?)**. Grès hétérogène, granulométrie et tri variable : inclusions plus ou moins grosses, de calcaires et de radiolarites. Très peu de blocs, non en place (**Figure 38**, E, F, G).
- Faciès 4 : **grès, allochtone (?)**. Non en place : autre grès, fin, un chapiteau unique (**Figure 38**, D).

Utilisation : Sur la base du travail sur le Temple par Kanellopoulos et Partida, 2021, on estime que le faciès 1 représente 60% du volume de pierre mis en œuvre et le faciès 2 représente 38% du volume. Les faciès 3 et 4 représentent un volume symbolique de 1% chacun, même si l'entablement (partie au-dessus des colonnes, sous le fronton et le toit) devait aussi être dans un des deux faciès, mais aucun bloc n'a été retrouvé (uniquement un fût de colonne et un chapiteau) (Kanellopoulos & Partida 2021).

Carrières associées : Il n'y a pas de carrières associées avec certitude. Les carrières du marbre gris seraient celles situées juste à côté de Livadia. Le travertin peut être considéré régional, car, s'il n'affleure pas dans l'environnement immédiat du site, ce sont des formations communes dans les environnements karstiques. Les grès sont d'origine inconnue : s'ils ne sont pas présents dans les environs directs du site, ils peuvent venir de la Béotie.

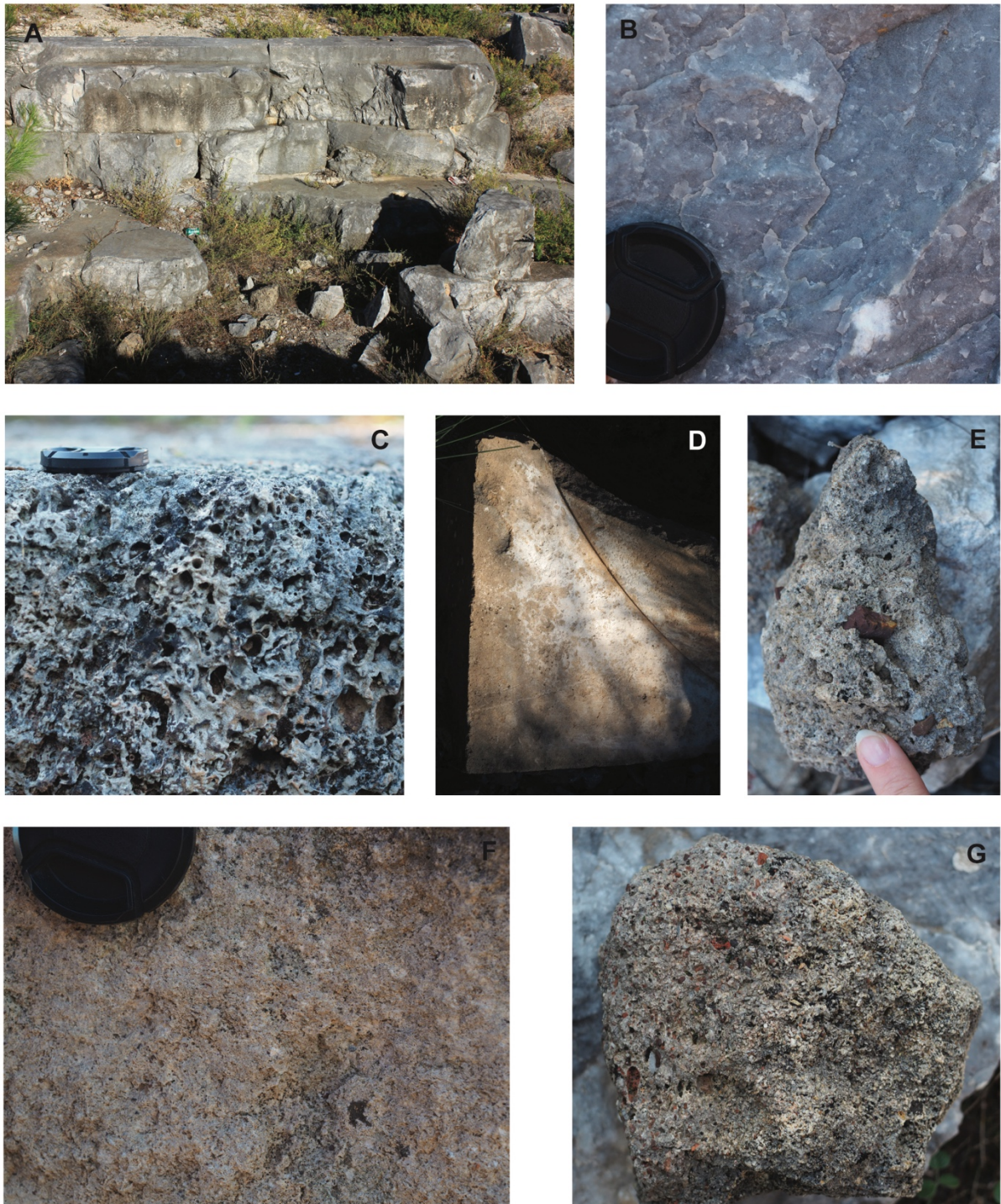


Figure 38. Le Temple de Zeus à Livadia : les pierres mises en œuvre.

A et B : la krépis (plateforme servant de soubassement à un monument) en marbre gris, et zoom sur la texture grossière de la roche. C : travertin, utilisé en fondation. D : chapiteau errant, en calcaire fin. E, F, G : grès hétérogène de granulométrie variable, fragments de colonne, non en place. Le cache de l'objectif fait 5 cm de diamètre.

3.5 Le sud et l'ouest du Golfe

3.5.1 Contexte topographique

Ici sont reprises les données de l'article publié sur le Golfe de Lechaion (voir [3.2](#)), synthétisées pour compléter les données des autres sites de la région : **Corinthe** (site n°20), **Sicyone** (site n°21), **Perachora** (site n°22) et **Isthmia** (site n°23) (les figures ne sont pas remises cependant).

Les sites situés sur le pourtour du Golfe de Corinthe au sens-strict du terme (qui se trouvent sur la côte de la mer de Corinthe) sont finalement assez peu nombreux. Or, il faut un nombre assez grand de sites pour établir des motifs dans l'utilisation des pierres calcaires pour la construction. C'est aussi en comparant avec des sites hors du Golfe, que l'on peut observer des spécificités à l'échelle du Golfe et jusqu'où certains faciès peuvent être exportés.

Les sites archéologiques étudiés sont les suivants (**Figure 39**) :

- Au sud, la cité de **Kléonai** (site n°24), le sanctuaire de **Némée** (site n°25), et la cité de **Phlious** (site n°26), se trouve à la limite de la Corinthie, à la frontière avec l'Argolide.
- Deux sites isolés, respectivement dans les bassins **de Stymphale** (site n°27) et de **Phénéos** (site n°28), ne sont plus en Corinthie.
- L'extrême sud est étudié avec les sites d'Argolide : la cité d'**Argos** (site n°29) et le sanctuaire de l'**Heraeum d'Argos** (site n°30) ; plus à l'ouest, le sanctuaire d'**Épidaure** (site n°31), la cité de **Trézène** (site n°32), et le sanctuaire de **Kalaurie** à Poros (site n°33).
- Enfin, à l'ouest, quelques sites ont été étudiés dans un but de comparaison : **Kalydon** (site n°34), **Pleuron** (site n°35), **Elis** (site n°36) et **Olympie** (site n°37).

Les sites de Kléonai, Némée et Phlious se trouvent à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest de Corinthe, respectivement dans des bassins isolés qui présentent des géologies similaires : un remplissage quaternaire (alluvions, éluvions, conglomérats, cônes et débris de pente) et des reliefs peu marqués composés de dépôts sédimentaires plus anciens, majoritairement conglomératiques, du Pliocène supérieur (Upper Group). Entre la Corinthie et l'Argolide, la limite géographique est marquée par des premiers massifs correspondant à des unités mésozoïques (calcaires) et cénozoïques (flysch, calcaires). Le bassin de l'Argolide s'ouvre vers le sud sur le Golfe d'Argolide, et présente un remplissage d'alluvions récents avec

des reliefs plus marquées (brèches quaternaires) composés à l'est de la série pélagonienne, et à l'est, de la série ionienne.



Figure 39. Cartes topographiques du sud et de l'ouest du Golfe de Corinthe.

3.5.2 Description des roches mises en œuvre

- **Site 20 : Corinthe (37°54'21.64"N, 22°52'45.40"E)**

Type de vestige : Corinthe est une cité-état, détruite par les romains en 146 avant JC, dont il ne reste aujourd'hui que quelques vestiges grecs : le premier état de la fontaine de Pereine, la fontaine de Glauke, le temple d'Apollon, le bâtiment nord, la stoa (ou portique, bâtiment ouvert avec une colonnade à l'avant) nord et sud, le théâtre. Au sud, la fontaine de Lerna et l'Asclépiéion, et un Gymnase. Non observé : le stade classique et hellénistique, un monument circulaire, le temple A (ou Aedicula) ; les deux ports, Lechaion et Kenchrées, où très peu de vestiges restent visibles ; sur l'Acrocorinthe, occupée et fortifiée dès l'Antiquité et jusqu'à la période moderne, devait se trouver un temple peut être dédiée à Aphrodite. Voir le guide du site (Sanders, 2018).

État des fouilles / études : Le site est fouillé continuellement depuis le XIXe siècle, voir les monographies Corinth de l'ASCSA (Williams & Bookidis 2003).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 2 dans la littérature = **5 faciès au total**

Description des faciès : voir l'article en [3.2](#)

- Faciès 1 : **grès, local**. Dune oolithique.
- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Conglomérat polygénique.
- Faciès 3 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif, gris.
- Faciès 4 : **calcaire, régional**. Calcaire noir. Non observé.
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche. Non observé.

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 96% du volume de roche mise en œuvre. Les faciès 2, 3, 4 et 5 représentent des volumes symboliques de 1% chacun. Le faciès 2 est utilisé très rarement, pour des fondations et des murs non visibles, comme le faciès 3, employé par exemple dans les escaliers descendant au théâtre. Le faciès 4 n'a servi que pour des bases, que nous n'avons pas observées (Williams *et al.* 1974). Le faciès 5 a été utilisé pour la sculpture uniquement (Johnson 1931).

Carrières associées : Des traces d'extraction ont été observées à l'ouest, ayant pu fournir le conglomérat ([Q15](#)) ; des carrières se trouvent dans le site, et les carrières d'Examilia ([Q16](#)) ont pu fournir la dune oolithique. Une hypothèse pour l'origine du calcaire noir est la carrière d'Argos ([Q23](#)).

- **Site 21 : Sicyone (37°59'2.14"N, 22°42'49.24"E)**

Type de vestige : La cité de Sicyone se compose aujourd'hui d'une ancienne acropole avec un temple hellénistique, un portique, une palestres, un bouleutérion (bâtiment de conseil), et un stade. Observé de loin : le théâtre hellénistique, en travaux en 2021 et inaccessible.

État des fouilles / études : fouillé et étudié depuis le XIXe siècle (Lolos 2021).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 1 faciès non en place + 1 faciès dans la littérature = **5 faciès au total**

Description des faciès : voir l'article en [3.2](#)

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique.
- Faciès 2 : **grès, régional**. Calcaire fin, oolithique.
- Faciès 3 : **grès, local**. Calcarénite, non observé (décrite dans (Lolos 2021)).
- Faciès 4 : **calcaire dur, régional**. Calcaire massif, gris. Non en place.
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche.

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, la faciès 1 correspond à 90% du volume de roche mis en œuvre. Le faciès 2 correspond à 7% du volume, si l'on considère l'élévation du temple entièrement dans ce faciès. Le faciès 3, 4 et 5 représentent des volumes symboliques de 1% chacun : le faciès 3 est employé au théâtre, mais le volume n'a pas pu être estimé ; les faciès 4 et 5 sont des éléments isolés (bases au musée, sculpture).

Carrières associées : Pour les carrières locales, voir le chapitre de Ch. Hayward dans (Lolos 2021), et la carrière de conglomérat du stade ([Q17](#)). Le faciès 4 (calcaire dur) n'a pas d'origine attestée mais les affleurements les plus proches sont à quelques kilomètres au sud : ils ne peuvent pas être locaux. Le faciès 2 provient des carrières de Corinthe ([Q16](#)).

- **Site 22 : Perachora (38° 1'41.19"N, 22°51'9.89"E)**

Type de vestige : Sanctuaire d'Héra avec un temple dorique du VI^e siècle BC, un autel du IV^e siècle avant JC, une stoa en L (ou portique), une agora, des citernes. La ville antique avec systèmes hydrauliques sur le plateau supérieur n'est pas prise en compte : il n'y a pas d'étude architecturale publiée, l'élévation est manquante et les vestiges très épars et non identifiés (Tomlinson 1969).

État des fouilles / études : Le site a été fouillé par la BSA dans les années 30 (Payne 1940), avec quelques travaux plus récents concernant le sanctuaire (Menadier 1995; Lefèvre-Novaro 2000).

Nombre de faciès employés : 4 faciès en place + 1 dans la littérature = **5 faciès au total**

Description des faciès : voir l'article en [3.2](#)

- Faciès 1 : **travertin, local**. Stromatolithes.
- Faciès 2 : **grès, régional**. Dune oolithique de Corinthe.
- Faciès 3 : **grès, local (?)**. Grès arénite.
- Faciès 4 : **calcaire dur, local**. Calcaire mésozoïque gris.
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche (non observé).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 correspond à 86% du volume mis en œuvre dans le sanctuaire. Le faciès 2 représente 10% du volume si on considère l'élévation du Temple (Menadier 1995). Le faciès 3 représente 2% du volume : il est employé dans le dallage à l'ouest de l'autel (et deux structures antérieures dans le temple d'Héra d'après (Payne 1940). Le faciès 5 aurait été utilisé pour le toit du Temple du VI^e siècle avant

JC et représente un volume symbolique de 1% (marbre de Paros (Payne 1940). Le faciès 4 représente un volume symbolique de 1% dans le sanctuaire.

Carrières associées : Le faciès 1 a été extrait sur la côte nord de la péninsule (traces d'extraction au nord et stromatolithes ouverts) et plus haut dans la plaine (voir [Q13](#)). Le faciès 3 est d'origine inconnue mais sûrement locale : il peut correspondre aux formations sédimentaires du plateau supérieur par exemple. Le faciès 4 a été extrait sur place et sûrement des massifs à l'ouest, où les carbonates affleurent (Bornovas *et al.* 1984). Pour le faciès oolithique (2), la provenance la plus probable est la région de Corinthe, au niveau des carrières d'Examilia ([Q16](#)).

- **Site 23 : Isthmia (37°54'56.61"N, 22°59'34.88"E)**

Type de vestige : Sanctuaire de Poséidon (temple, autel) avec un théâtre et un stade. Cependant, il ne reste que très peu d'élévation : le site a servi de carrière de pierre pour la construction de l'Hexamilion, fortification romaine qui traverse l'Isthme de Corinthe.

État des fouilles / études : fouilles de l'ASCSA depuis la fin du XIXe siècle, avec l'Université du Michigan et de Chicago ; les résultats sont publiés dans une série de monographie de l'ASCSA, et en particulier l'architecture en 1973 (Broneer 1973).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 1 faciès non en place + 3 dans la littérature = **7 faciès au total**

Description des faciès : voir l'article en [3.2](#)

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Polygénique, grossier.
- Faciès 2 : **grès, local**. Polygénique, fin.
- Faciès 3 : **grès, régional**. Dune oolithique.
- Faciès 4 : **calcaire dur, régional**. Calcaire noir, non observé.
- Faciès 5 : **calcaire tendre, local**. Calcaire bioclastique, à huitres.
- Faciès 6 : **marbre, régional**. Bleu-gris (non observé).
- Faciès 7 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche (non observé).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente environ 81 % du volume de pierre mis en œuvre et le faciès 2 représente 5 % du volume total (en place et blocs épars). Le faciès 3 représente 10% du volume, si l'on considère que l'élévation du temple est faite dans la même roche. Les faciès 4, 5, 6 et 7 sont associés à un volume symbolique de 1% chacun (soit non en place, soit volume trop faible pour être estimé) :

le faciès 6 proviendrait de Laconie ; le faciès 7 a été employé pour le toit du Temple et la statuaire (Brooner, 1973).

Carrières associées : les carrières d'Examilia (Q16), d'Argos (Q23) et les carrières locales d'Isthmia (Q18, Q19).

- **Site 24 : Kléonai (37°49'32.60"N, 22°46'36.50"E)**

Type de vestige : Cité dont il ne reste sur l'acropole qu'un temple archaïque (appartenant à un sanctuaire), et dans la vallée, un temple d'Hercule. Non observé : les murs de fortifications de l'acropole et les murs de terrasse.

État des fouilles / études : l'étude architecturale des vestiges est menée depuis les années 2000 (Marchand 2002, 2009; Mattern 2013, 2015).

Nombre de faciès employés : 1 faciès en place + 1 faciès non en place + 1 faciès isolé + 2 faciès dans la littérature = **5 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **travertin, local**. Tuf fluviatile, à grains fin, tubulaire et compact, de couleur blanc-jaune (**Figure 40, A**).
- Faciès 2 : **grès, régional**. Grès fin, bien trié, oolithique, avec stratification (**Figure 40, C et D**).
- Faciès 3 : **calcaire dur, régional**. Calcaire massif, gris, bloc isolé (**Figure 40, B**).
- Faciès 4 : **calcaire dur, régional**. Non observé : noir (Mattern 2015)
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Non observé : blanc (Mattern 2015).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 96% du volume de roche mis en place (murs, fondations, élévation). Les autres faciès sont isolés, ils représentent chacun un volume symbolique de 1%. Le faciès 2 a été utilisé sur l'acropole (blocs épars) : peut-être aussi pour l'élévation du temple. Un bloc du faciès 3 a été retrouvé sur l'acropole uniquement. Les faciès 4 et 5 n'ont pas été observés, mais ils sont documentés sur le temple d'Hercule.

Carrières associées : Les carrières de Kléonai ont fourni le faciès 1 (Q22), et il est probable que le faciès 2 provienne des carrières de Corinthe (Q16) et le faciès 4 des carrières d'Argos (Q23).

Le calcaire dur est considéré régional car il n'affleure pas aux alentours de Kléonai (Bornovas *et al.* 1972).



Figure 40. Le site de Kléonai : les pierres mises en œuvre.

A : bloc non en place au temple d'Hercule, en travertin. B : bloc isolé sur l'acropole, en calcaire dur. C et D : bloc en grès oolithique avec stratification.

- **Site 25 : Némée (37°48'34.27"N, 22°42'37.65"E)**

Type de vestige : Sanctuaire fondé au VI^e siècle avant JC, composé du temple de Zeus, d'un autel monumental, d'oïkos (petits bâtiments pour déposer des offrandes), de maisons et d'un stade, où avaient lieu les jeux panhelléniques.

États des fouilles / études : Fouilles de l'ASCSA depuis 1924 : les résultats sont publiés dans une série de monographies et d'articles dans Hesperia. Voir le guide (Miller 1989).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **travertin, local**. Tuf compact, à grain fin, tubulaire (porosité variable), de couleur blanc-jaune (**Figure 41**, A et B).
- Faciès 2 : **grès, local (?)**. Grès fin, détritique, avec galets ronds (**Figure 41**, F)
- Faciès 3 : **conglomérat, local**. Poudingue polygénique, plus ou moins grossier, *clast-supported*.
- Faciès 4 : **calcaire dur, régional**. Calcaire gris, massif, de type *mudstone*, avec rudistes (**Figure 41**, C et D).
- Faciès 5 : **calcaire dur, régional**. Noir, non observé sur le site (Miller *et al.* 2001), mais dans le musée (**Figure 41**, E).
- Faciès 6 : **marbre, allochtone**. Blanc, non observé (Birge *et al.* 1992).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 91% du volume de roche et est utilisé pour le temple (fondation, élévation), les oikos et le stade. Le faciès 2 est employé dans l'autel du temple et des bâtiments isolés (5%), et des éléments ont été identifiés au Musée : il pourrait aussi correspondre au « pôros plus fin » décrit par (Hill 1966), pour des chapiteaux corinthiens. Le faciès 3 représente un volume symbolique de 1%. Deux bases non en place sont dans le faciès 4 (1%). Le faciès 5 n'a pas été observé en place (1%), sauf au Musée pour une base ; d'après la littérature, un calcaire noir similaire aurait été employé pour le seuil de l'entrée du temple, les marches d'un monument circulaire, et dans la structure Nu (Hill 1966; Birge *et al.* 1992; Miller *et al.* 2001). Le faciès 5 est employé pour les simas – dispositif au bord du toit pour les conduites des eaux de ruissellement - du temple (Birge *et al.* 1992) (1%).

Carrières associées : Les carrières de Kléonai ont fourni le faciès 1 ([Q22](#)), et les carrières d'Argos probablement le faciès 5 ([Q23](#)). Les faciès 2 et 3 peuvent être trouvés dans la plaine, d'où une hypothèse locale. Le faciès 4 est un faciès que l'on peut retrouver dans les unités de calcaires crétacés qui affleurent au S/E, à 2km (Tataris *et al.* 1970a).



Figure 41. Le sanctuaire de Némée : les pierres mises en œuvre.

A : le Temple de Zeus, en travertin. B : colonne en travertin du stade. C et D : bases en calcaire dur, non en place, avec rudistes. E : base en calcaire noir, au Musée de Némée. F : bloc de l'ancien temple, en grès fin, au Musée de Némée.

- **Site 26 : Phlious (37°50'40.25"N, 22°38'47.67"E)**

Type de vestige : Acropole de la cité-état de Phlious, avec un théâtre, un portique ouvert de la deuxième moitié du Ve siècle avant JC, et une fontaine (?). Non observés : les restes de murs sur l'acropole.

État des fouilles / études : fouilles en 1924 (Washington 1923), puis reprise des fouilles par l'ASCSA (Biers 1971, 1973, 1975). Depuis, il y a eu des prospections mais pas de fouilles (Wright *et al.* 1990; Alcock 1991).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 1 faciès isolé = **4 faciès au total**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : conglomérat, local.** Poudingue polygénique avec clastes de calcaires centimétriques, *clast-supported*, typique des dépôts fluviaux (**Figure 42, B**).
- **Faciès 2 : travertin, régional (?).** Très altéré, mais massif avec forte porosité (tubulaire) (**Figure 42, A**).
- **Faciès 3 : grès, local.** Grès fin, bien trié, avec des clastes de calcaires et radiolarites (**Figure 42, C**).
- **Faciès 4 : calcaire dur, local.** Calcaire type *mudstone*, sombre (un bloc isolé) (**Figure 42, D**).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 60 % du volume de roche (murs de terrasse, fondations). Le faciès 2 représente 37 % (colonnes, élévation de la fontaine). Le faciès 3 représente un volume faible (2%) : la première rangée de gradins du théâtre et quatre trônes (Biers 1971), et peut-être ce même faciès a été utilisé pour des chapiteaux remployés (non observés, mais décrits en « pôros fins » par Biers (1975)). Le faciès 4 représente un volume symbolique de 1% (bloc isolé).

Carrières associées : Il n'y a pas de carrières identifiées (non recherchées), mais des travaux de terrassement ont pu fournir le site en faciès 1, qui compose l'Acropole (comme au théâtre, creusé dans le rocher). Le faciès 2 provient sûrement des carrières de Kléonai, même si cela doit être vérifié (Q22). Le faciès 3 peut correspondre à un sous-faciès plus fin conglomératique, mais pourrait aussi venir de la région de Corinthe (voir la ressemblance avec le calcaire de Kenchrées, Q20, Q21).



Figure 42. La cité de Phlious : les pierres mises en œuvre.

A : base de colonne en travertin. B : bloc de conglomérat, de la terrasse du soutènement du portique. C : le grès fin, employé pour le premier gradin du théâtre. D : bloc isolé en calcaire dur.

- **Site 27 : Stymphale (37°51'33.40"N, 22°27'36.70"E)**

Type de vestige : De la cité de Stymphale ont été observés l'acropole, avec des murs de fortification, l'agora, le théâtre taillé dans le rocher et un temple d'Athéna.

État des fouilles / études : Le site a été fouillé et le sanctuaire étudié (Hagerman *et al.* 2014).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 1 dans la littérature = **3 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Massif, gris, légèrement karstique (**Figure 43, A**).
- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Brèche calcaire, clastes pluri-centimétriques, clast-supported, monogénique (**Figure 43, B**).
- Faciès 3 : **marbre, allochtone**. Blanc, non observé (Williams *et al.* 1997).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 79% du volume de roche mis en œuvre (temple d'Athéna : fondations en calcaire et élévation en briques de terre (Hagerman et al., 2014) ; bases, sols, murs). Le faciès 2 représente 20% du volume (murs, fondations). Le faciès 3 représente un volume symbolique de 1% (Paros (Williams *et al.* 1997)).

Carrières associées : Il n'y a pas de carrières associées, mais les terrassements (route taillée, agora et escaliers) ont pu fournir les faciès 1 et 2 : le relief de l'acropole est composé de calcaires et brèches monogéniques récentes.



Figure 43. La ville de Stymphale : les pierres mises en œuvre.

A : les fondations du Temple d'Athéna en calcaire dur (élévation en brique crue). B : conglomérat monogénique, employé en fondation.

- **Site 28 : Phénéos* (37°54'32.59"N, 22°18'27.34"E)**

Type de vestige : Le site de la cité de Phénéos se présente aujourd'hui comme une acropole au pied de laquelle se trouve un Asclépiéion, cependant très ruiné. Non observés : l'acropole, les murs de fortification et une tour dans la plaine.

État des fouilles / études : l'Asclépiéion a été fouillé dans les années 1960 (Jost 1985; Tausend 2000) et des fouilles gréco-autrichiennes ont lieu sur les fortifications de l'acropole (2010-2015) (Lehner 2012; Lehner *et al.* 2013).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 1 dans la littérature = **4 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **Travertin, local (?)**. Tuf tubulaire, bioconstruit, avec des traces de racines, (cavités) engendrant une forte porosité. Couleur blanche-grise (**Figure 44**, A et B).
- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Conglomérat monogénique, *clast-supported*, composé de clastes de calcaires centimétriques à pluri-centimétriques dans une matrice argileuse (**Figure 44**, C).
- Faciès 3 : **calcaire dur, local (?)**. Calcaire massif avec joints stylolithiques, couleur gris-noir (**Figure 44**, D).
- Faciès 4 : **marbre, allochtone**. Couleur blanche.

Utilisation : Le site est trop peu étudié, car peu conservé et les vestiges trop épars pour faire des estimations de volume. De plus, les murs sont en moellons et non en pierre de taille (calcaire, schiste, grès, travertin hétérogène). Le faciès 1 a été employé pour les bases des colonnes et les fondations du monument. Le faciès 2 est employé pour les fondations d'une base et le faciès 3 pour la base même. Une statue colossale en marbre du IIe siècle avant JC a été identifiée (Daux 1959).

Carrières associées : Une carrière a été repérée à 2,5 km au sud dans la littérature (mais on ne sait pas quel faciès y est exploité) (Tausend, 2000 ; Lehner et al., 2013). La provenance du faciès 1 reste inconnue, mais elle est sûrement locale car des affleurements de travertin sont connus dans la région : le bassin de Phénéos est un poljé (une dépression karstique, remplie de dépôts alluviaux, ancien lac), où des formations de travertin sont communes. Les faciès 2 et 3 sont aussi sûrement locaux (brèche de pente autour de la vallée, acropole en calcaire).

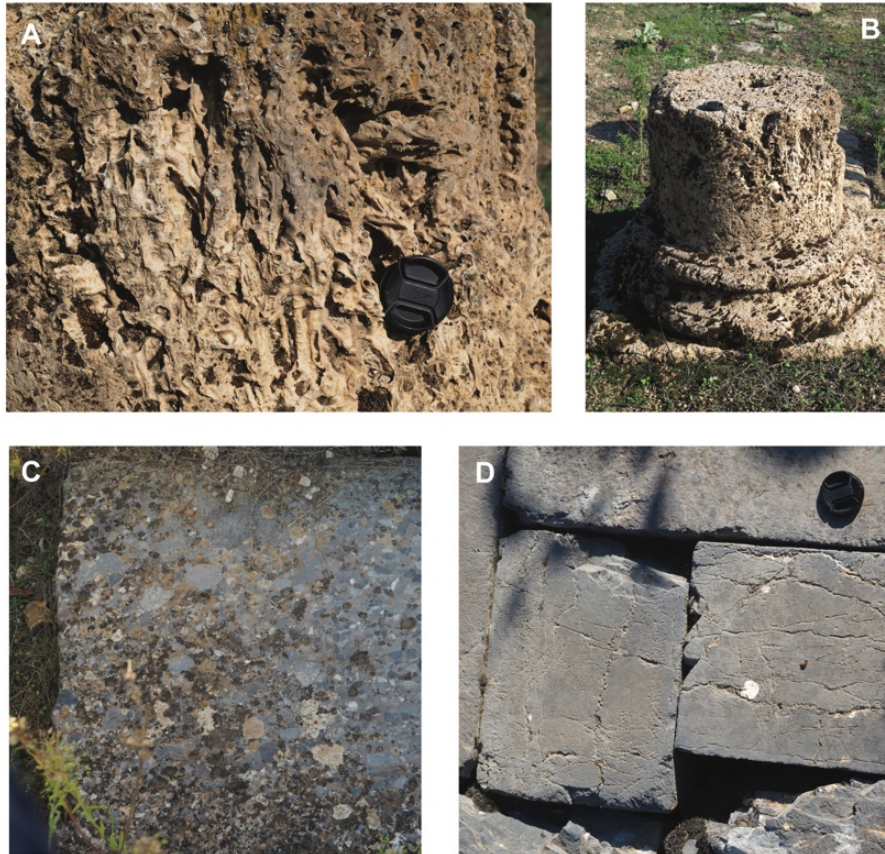


Figure 44. L'Asclépiéion de Phénéos : les roches mises en œuvre.
 A et B : bases de colonne et fondations en travertin. C : bloc de conglomérat, employé dans la fondation de la base de statue monumentale. D : la base de la statue en calcaire dur.

- **Site 29 : Argos (37°37'50.06"N, 22°43'15.55"E)**

Type de vestige : Uniquement l'agora a été étudiée (portique sud, salle hypostyle, collecteur d'eau ; portique nord) avec le sanctuaire d'Apollon Lykeios (non retrouvé, mais il reste des vestiges de son autel du Ve siècle avant JC et d'un portique), et un théâtre. Non observé : temple K à l'extérieur ; les acropoles de Larissa et de l'Aspis ; le sanctuaire d'Apollon Deiradiôtes (temples d'Apollon, d'Athéna, Tholos, autel, gradins) ; sanctuaire d'Aphrodite archaïque et classique au sud du théâtre.

État des fouilles / études : le site est fouillé depuis le XXe siècle par l'EFA. Voir le guide de Piérart & Touchais, 2013, et la monographie à paraître de Touchais et Fachard, sur les vestiges et les fouilles de l'Aspis.

Nombre de faciès employés : 4 faciès en place + 1 faciès non en place + 3 faciès isolés + 1 dans la littérature = **9 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Gris à rose, type *mudstone* avec des joints stylolithiques, des veines de calcites, et se recouvre d'une patine grise (**Figure 45, E**).
- Faciès 2 : **travertin, régional (?)**. Concrétion calcaire plus ou moins fine, traces de racines de plantes. Plusieurs sous-faciès : un faciès très fin et plus tendre ; un avec des concrétions plus grossières mais avec une porosité encore limitée, puis un faciès très grossier avec une plus forte porosité, des grosses traces de racines et des films de calcaire bien marqués (**Figure 45, C et D**).
- Faciès 3 : **calcaire tendre, local (?)**. Faciès sédimentaire détritique, peu consolidé, hétérogène avec galets de calcaires, légèrement lité (alternance argilo-calcaire) (**Figure 45, B**).
- Faciès 4 : **calcaire tendre, allochtone**. Calcaire coquillier marin, peu consolidé, type *floatstone* composé de coquilles de bivalves formant jusqu'à 50% de la roche (**Figure 45, G**).
- Faciès 5 : **grès, local**. Grès (grains de moins de 2 mm) lié par peu de matrice ; les grains sont ronds, parfois quelques galets plus larges. Nature des grains calcaires variés. Rares blocs, non en place (**Figure 45, H**).
- Faciès 6 : **calcaire tendre, local**. Calcaire fin, homogène, presque lithographique, couleur claire. Rares blocs, non en place (**Figure 45, I**).
- Faciès 7 : **conglomérat, local**. Conglomérat polygénique, composé de plus de 80% de clastes ronds de calcaires liés par une matrice calcaire. Un seul bloc (non en place) (**Figure 45, J**).
- Faciès 8 : **calcaire dur, régional**. Calcaire noir type *mudstone* très fin, noir, diaclases nombreuses, rares veines de calcite, patine bleutée. Second type similaire : calcaire type *mudstone* gris foncé, avec rudistes et coquilles, avec quelques joints stylolithiques, pas de diaclases (**Figure 45, F**).
- Faciès 9 : **marbre, allochtone**. Blanc (non observé).

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles (uniquement l'agora), le faciès 1 représente 40 % du volume de roche mis en œuvre (blocs découpés dans le sens des stylolithes, pour des sols et des assises supérieures). Le faciès 2 représente 40% du volume, avec le faciès fin utilisé pour les éléments de sculpture (gouttes, triglyphes...) ; le faciès moyen

pour des assises mises à l'air libre mais non stuquées (degré de la krépis, sous le stylobate, l'assise portant les colonnes) ; le faciès le plus grossier est employé pour les colonnes en particulier. Le faciès 3 représente 12% du volume, et est employé uniquement dans des fondations. Le faciès 4 est employé dans un seul monument, non à l'air libre (2%). Les faciès 5, 6 et 7 ne sont pas en place : ils représentent un volume symbolique de 1% chacun (blocs isolés). Le faciès 8 a été employé pour des bases de statue et les triglyphes de l'autel classique (non en place), avec deux sous-faciès légèrement différents (2%). Le faciès 9 a été utilisé uniquement dans la sculpture (1%) (non observé).

Carrières associées : Les faciès 1, 3, 5, 6 et 7 sont considérés locaux car ils peuvent provenir des acropoles (calcaires crétacés) ou de la plaine (alluvions) (Savoyat *et al.* 1971). Les hypothèses pour les autres faciès sont : les carrières d'Argos ([Q23](#)) pour le faciès 8 ; de Kléonai ([Q22](#)) pour le faciès 2 ; de Mégare ([Q12](#)) pour le faciès 4.

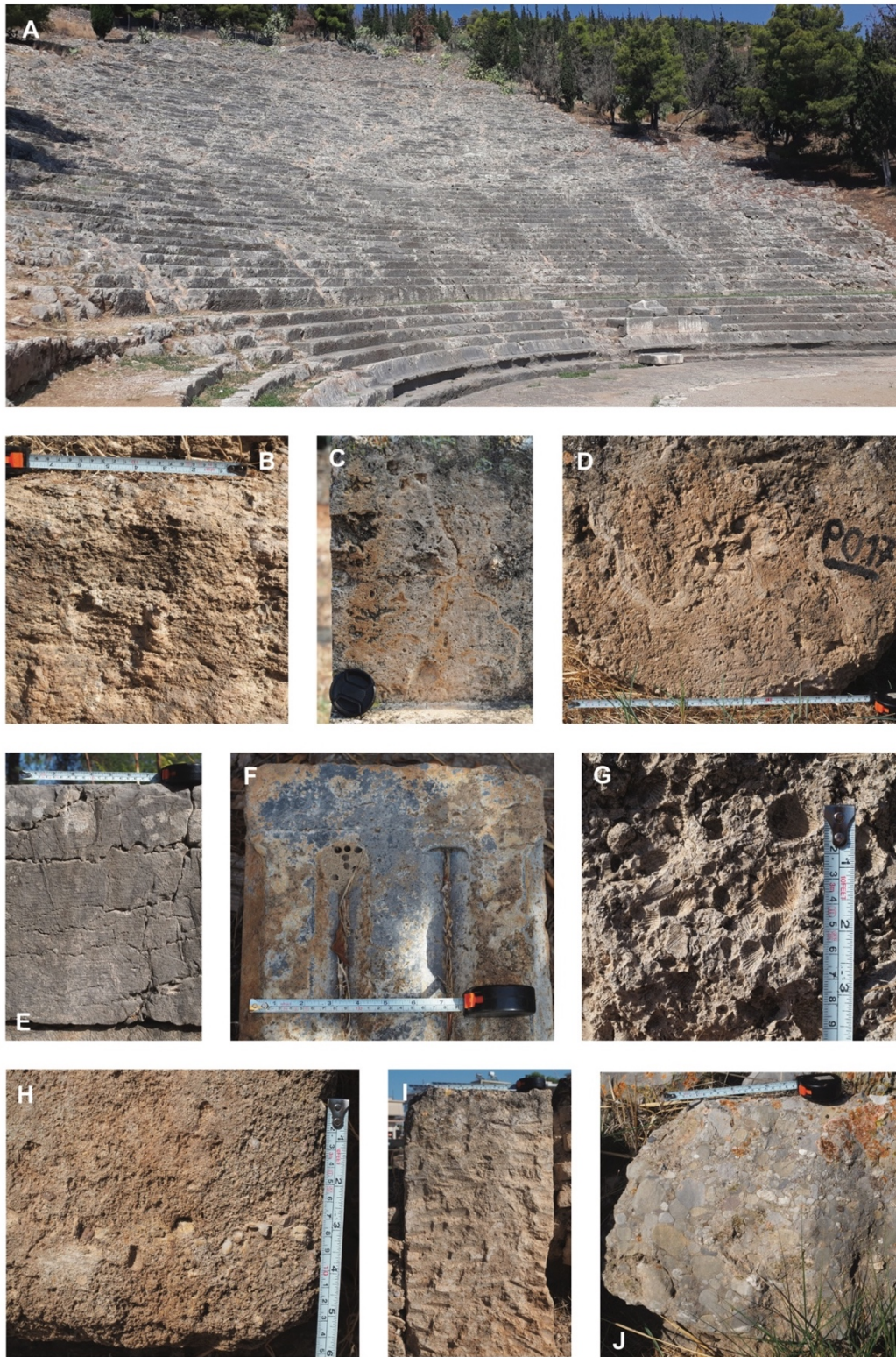


Figure 45. L'agora d'Argos : les pierres mises en œuvre.

A : le théâtre, taillé dans le calcaire dur de l'acropole. B : le calcaire tendre local, faciès détritique peu consolidé. C et D : le travertin, plus ou moins fin, avec des films indurés. E : calcaire dur local à joints stylolithiques. F : calcaire dur noir. G : calcaire coquillier marin.

H : grès grossier, bloc isolé. I : calcaire tendre, bloc isolé. J : conglomérat, bloc isolé.

- **Site 30 : l'Héraion d'Argos (37°41'30.62"N, 22°46'30.23"E)**

Type de vestige : Sanctuaire avec un culte d'Héra attesté à partir du VI^e siècle avant JC, mais son occupation est postérieure. On y trouve un temple ancien sur une terrasse monumentale ; un temple classique du Ve siècle avant JC ; plusieurs stoa (ou portique) (4) et d'autres monuments (3).

État des fouilles / études : Les fouilles du XIX^e siècle de l'ASCOSA ont été publiées dans deux volumes (Waldstein & Washington 1902), mais le sanctuaire n'a pas fait l'objet d'une étude extensive depuis (Piérart 1996; Billot 1997), à l'exception du temple d'Héra (Pfaff 2003)

Nombre de faciès employés : 4 faciès en place + 1 faciès non en place + 1 dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **conglomérat, local**. Conglomérat polygénique, *clast-supported*, composé de clastes ronds à sub-ronds pluri-centimétriques, de calcaires, grès et radiolarites, dans une matrice calcaire, typique des dépôts fluviatiles (**Figure 46, A**).
- Faciès 2 : **calcaire tendre, local**. Faciès détritique calcaire, stratifié, hétérogène, présentant différents degrés de lithification, avec généralement des encroûtements calcaires et des traces de bioturbations, parfois des débris de calcaires. Dépôts fluviatiles (**Figure 46, D et G**).
- Faciès 3 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif type *mudstone*, stylolithes. Couleur variable : gris, vert, beige (**Figure 46, B**).
- Faciès 4 : **travertin, régional**. Concrétion calcaire stratifiée, parfois tubulaire, massif, bioconstruite, avec une forte porosité (**Figure 46, C, E et F**).
- Faciès 5 : **calcaire dur, régional**. Calcaire fin, sans porosité, cristallin et noir. Non en place (blocs isolés) (**Figure 46, H**).
- Faciès 6 : **marbres, allochtones**. Blancs, non observé.

Utilisation : Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 40% du volume de roche mis en œuvre : murs de terrasses, fondations. Le faciès 2 représente 20% du volume de roche, utilisé pour les fondations, notamment les fondations du temple classique et des gradins ; il semble n'être jamais utilisé à l'air libre (Pfaff 2003). Le faciès 3 représente environ 15% du volume de roche : il est employé pour les sols, certaines assises supérieures et quelques pièces moulurées. Le faciès 4 est utilisé pour les superstructures (par exemple, celle

du temple classique) et certains murs, et représente 20% du volume. Le faciès 5 représente un volume symbolique de 3%, car seulement observé en blocs errants : pour des triglyphes et des bases (Caskey & Amandry 1952). Le faciès 6 est utilisé pour les sculptures et le toit du Temple d'Héra (volume symbolique de 2%) (Pfaff 2003).

Carrières associées : pas de traces d'extraction sur place (non recherchées) mais exploitation locale sûrement : le faciès 1 affleure à côté du site. Le faciès 2 est aussi probablement local, car cohérent avec les formations présentes dans la plaine (formations pléistocènes, dépôts fluviaux-lacustres). De même, le faciès 3 peut provenir des collines alentours (calcaires mésozoïques). Voir les carrières d'Argos ([Q23](#)) pour le calcaire noir, et de Kléonai ([Q22](#)) pour le travertin.



Figure 46. L'Héraion d'Argos : les pierres mises en œuvre.

A : conglomérat polygénique, bloc de fondation. B : calcaire dur, mouluré. C : blocs de travertin, non en place. D et G : calcaire tendre, dépôts fluvatile employé en fondation. E et F : éléments d'une colonne en travertin (base, fût). H : triglyphe d'angle en calcaire dur, noir.

- **Site 31 : Épidaure* (37°35'54.24"N, 23° 4'26.43"E)**

Type de vestige : On trouve le sanctuaire d'Asclépios (dieu de la médecine, fils d'Apollon), ou Asclépiéion, particulièrement reconnu au IV^e siècle avant JC avec des temples, une tholos (bâtiment rond), des propylées (entrées monumentales), des portiques (dont l'Abaton, pour accueillir les malades), un stade et un théâtre construit au IV^e siècle avant JC. Non observés : le sanctuaire d'Apollon (à l'extérieur de l'Asclépiéion) et l'agora hellénistique.

État des fouilles / études : Les fouilles débutent au XIX^e siècle (Kavvadias 1891) et le site fait l'objet de nombreuses études et restaurations. En particulier, les matériaux ont été étudiés par

Varti-Matarangas & Matarangas (2000) : les données sont reprises en partie de l'article, complétées par nos observations personnelles. Cependant, les vestiges sont difficilement accessibles et les données peu précises. Les comptes de constructions retrouvés ont été étudiés (Burford, 1969 ; Prignitz, 2014 ; Kritzas et Prignitz, 2016).

Nombre de faciès employés : 4 faciès en place + 2 faciès non en place + 3 dans la littérature = **9 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Blanc et rouge, crétacé (sol, stylobate (assise de support de la colonnade) et pavement du Temple d'Asclépiéion)
- Faciès 2 : **calcaire dur, local**. Gris à silex (sol, gradins du théâtre, sol des propylées, les entrées monumentales du sanctuaire)
- Faciès 3 : **conglomérat, local**. Brèche rouge (première rangée du théâtre).
- Faciès 4 : **grès, allochtone**. Calcaire oolithique de Corinthe (bloc d'architecture non en place : triglyphe ; employé dans la tholos).
- Faciès 5 : **grès, allochtone**. Non observé : biocalcarénite d'Égine (?) pour les colonnes du Gymnase et de l'Abaton (lieu sacré, dont l'accès est réglementé).
- Faciès 6 : **calcaire lacustre, régional**. Calcrète : blocs errants, assise de fondation de la Tholos (Prignitz, 2014), et fondation des propylées.
- Faciès 7 : **calcaire dur, régional**. Non observé : calcaire noir massif. Pour le sol de la Tholos.
- Faciès 8 : **marbres, allochtones (2)**. Blancs. Pour la sculpture et le sol de la tholos, les sima (dispositif pour conduire les eaux de ruissellement, ici aux bords du toit) et acrotères (éléments décoratifs qui surmontent la couverture d'un édifice) de l'Asclépiéion (Pentélique d'après (Prignitz 2014) ; hypothèse de Naxos pour (Varti-Matarangas & Matarangas 2000).

Utilisation : Il n'est pas possible de réaliser une estimation de volume, le site étant aménagé pour le tourisme et les vestiges inaccessibles. L'utilisation des faciès est reprise en grande partie de la littérature, elle sera discutée ultérieurement (voir [6.3.1](#)).

Carrières associées : Les carrières dans la région ont été identifiées (Varti-Matarangas & Matarangas 2000). Voir les carrières de Corinthe ([Q16](#)) et d'Argos ([Q23](#)) pour les faciès importés.

- **Site 32 : Trézène (37°30'12.23"N, 23°20'53.46"E)**

Type de vestige : A l'ouest de la cité de Trézène, on trouve un sanctuaire d'Asclépiéios, avec un temple d'Hippolyte, un temple d'Aphrodite, ainsi que d'autres vestiges (bâtiment ouvert, murs, tours). Non visités : les vestiges dans la ville même.

État des fouilles / études : Le site est fouillé depuis le début du XXe siècle par l'EFA premièrement, puis le DAI (Welter 1941), mais les recherches récentes se concentrent sur la ville (Maria Giannopoulou, 2004 – 2010).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 faciès dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire dur, local**. Calcaire gris, type *mudstone*, massif avec très peu de porosité et des veines de calcite nombreuses (**Figure 47, B**).
- **Faciès 2 : travertin, local (?)**. Concrétion calcaire grossière, tubulaire avec une mégaporosité (cavités), très hétérogène (**Figure 47, D**)
- **Faciès 3 : calcaire tendre, local (?)**. Faciès détritique, peu consolidé, alternance calcaires et surface indurée, qui se délite (**Figure 47, A**).
- **Faciès 4 : grès fin, régional (?)**. Calcaire très fin, bien trié, homogène. Grains arrondis, quelques macro-pores (bioturbation ?). Couleur jaune (un bloc) (**Figure 47, C**).
- **Faciès 5 : calcaire tendre, allochtone**. Calcaire coquillier, type *floatstone*, avec empreintes de bivalves (blocs isolés) (**Figure 47, E**).
- **Faciès 6 : marbre, allochtone**. Blanc, non observé (Legrand 1897).

Utilisation : Le site ayant perdu la majorité de son élévation, les estimations volumétriques concernent les vestiges en place. Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente 80% du volume mis en œuvre : il est utilisé pour les sols et les murs (mais peut-être pas l'élévation). Le faciès 2 est employé pour l'élévation du Temple d'Hippolyte (5%) alors que ces fondations sont dans le faciès 3 (11%). Les faciès 4, 5, et 6 sont très peu représentés (blocs isolés) et correspondent à un volume symbolique de 1% chacun.

Carrières associées : Aucune carrière n'a été associée au site (non recherchées), mais on peut émettre l'hypothèse de Mégare ([Q12](#)) pour le faciès 5. Le grès fin est d'origine inconnue, potentiellement régionale même si aucune carrière n'est connue (voir allochtone, s'il provient de Corinthe ou d'Égine, mais un seul bloc a été observé). Les faciès 1, 2 et 3 sont considérés

comme locaux car cohérents avec le contexte géologique local (calcaires mésozoïques affleurant au sud, région montagneuse karstique avec résurgence d'eau pour le travertin, plaine alluviale) (Suesskoch & Bannert 1984).



Figure 47. Le sanctuaire de Trézène : les roches mises en œuvre.

A : les fondations du temple d'Hippolyte, en calcaire tendre. B : pas de porte en calcaire dur. C : colonne en grès fin, isolée. D : bloc de travertin avec macro-porosité, isolé. E : bloc isolé de calcaire coquillier.

- **Site 33 : Kalaurie (37°31'19.64"N, 23°28'46.88"E)**

Type de vestige : Sur l'île de Poros se trouve un sanctuaire de Poséidon (temple et téménos (espace sacré) datés d'environ 520 avant JC), avec une agora composée de quatre portiques ouverts (V-IVe siècle avant JC), d'autres bâtiments inconnus et un hérôon du IIIe siècle avant JC (édifice dédié à un héros). Cependant, il reste très peu de vestiges conservés au-dessus des fondations.

État des fouilles / études : Fouillé pour la première fois en 1894, la première étude complète est publiée par Welter (1941), avant que la fouille systématique soit reprise par l'institut suédois depuis 1997 sous la direction de B. Wells et I. Penttinen (Hjohlman *et al.* 2008; Penttinen & Wells 2009).

Nombre de faciès employés : 3 faciès en place + 2 faciès non en place + 1 dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif, très faible porosité, de couleur bleue et blanche (**Figure 48, A**).
- Faciès 2 : **grès, allochtone (?)**. Calcaire fin, oolithique, avec quelques traces de racines (d'Égine d'après (Welter 1941)) (**Figure 48, C**)
- Faciès 3 : andésite, une roche volcanique qui sera compté comme un **calcaire dur régional** car ces faciès n'apparaissent pas dans notre classement et c'est la seule exception : elle est aussi employée comme un calcaire dur (pour les stylobates, assises supportant une colonnade).
- Faciès 4 : **conglomérat, local**. Faciès détritique, *mud-supported*, clastes de calcaire dans une matrice plus fine (**Figure 48, B**).
- Faciès 5 : **calcaire tendre, allochtone**. Calcaire marin type *floatstone*, coquillier composé de bivalves, de couleur jaune (bloc isolé) (**Figure 48, D**).
- Faciès 6 : **marbre, allochtone**. Blanc, non observé (Welter 1941).
- Faciès : « poros » local, « de mauvaise qualité », non observé (Welter 1941).

Utilisation : Les estimations volumétriques sont très largement basées sur la littérature (Welter 1941), le site ayant perdu la majorité de son élévation. Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 est employé pour les murs et les fondations du temple (45%). Le faciès 2 n'a pas été observé en place (blocs errants de colonnes) mais d'après Welter (1941), le temple est construit intégralement dans ce faciès, ainsi que l'élévation d'un des halls, les bases et les chapiteaux (20%). L'andésite est employée pour le stylobate (assise supportant la colonnade) d'un des portiques, des colonnes monolithiques et des bases de colonnes, et en fondation du hall 3 (28%). Le faciès 4 est observé dans les murs et en blocs errants (5%). Les faciès 5 et 6 représentent un volume symbolique de 1% chacun (bloc isolé). Le faciès 7 a été identifié dans la littérature uniquement, mais n'a pas été observé sur le terrain (employé dans les fondations) (Welter 1941).

Carrières associées : Le faciès 1 est sûrement local puisqu'il compose la colline, des carrières ont été identifiées en contre-bas du site ; de même pour le faciès 4. Les carrières d'Égine sont connues dans la littérature et auraient pu fournir le faciès 2 (Welter 1941). Le faciès 5 pourrait provenir des carrières de Mégare ([Q12](#)). Enfin, l'andésite est d'origine régionale : elle n'est présente qu'au sud de l'île, sous la ville moderne de Poros, ou de Méthane.



Figure 48. Le site de Kalaurie : les pierres mises en œuvre.

A : mur de fond d'un portique, en calcaire dur. B : bloc de conglomérat. C : bloc architectural non en place, en grès fin (d'Égine ?). D : calcaire coquillier, bloc isolé.

- **Site 34 : Kalydon (38°22'19.4"N, 21°31'47.4"E)**

Type de vestige : On trouve un sanctuaire d'Artémis Laphria et un hérôon du IIe siècle avant JC, ainsi qu'un théâtre. Non observé : l'acropole (tours et murailles).

État des fouilles / études : Fouilles gréco-danoises en 1926-27 (Rhomaios *et al.* 1934; Dyggve 1948). Depuis 2015, *The Kalydon Archaeological Project* a repris l'étude topographique du site entier (sanctuaire et acropole) (Vikatou *et al.* 2019).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 3 faciès non en place / isolés + 1 dans la littérature = **6 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **grès, local**. Grès arénite, bien trié, composé de grains de quartz anguleux majoritairement, couleur orange – marron (**Figure 49**, A et E).
- Faciès 2 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif, faible porosité avec joints stylolithiques, gris clair (**Figure 49**, C et D).
- Faciès 3 : **travertin, régional (?)**. Non en place : un seul bloc identifié, concrétion calcaire avec forte porosité, très altéré (**Figure 49**, B).
- Faciès 4 : **grès, allochtone**. Grès bioclastique grossier, peu cimenté, de couleur blanche (blocs isolés, gros modules et petits blocs sculptés) (**Figure 49**, F).
- Faciès 5 : **grès, allochtone**. Grès fin, oolithique, bien trié, de couleur jaune (bloc isolé, sculpté) (**Figure 49**, G).
- Faciès 6 : **marbre, allochtone**. Blanc, non observé.

Utilisation : Il ne reste que très peu d'élévation. Sur la base de nos observations sur les vestiges visibles, le faciès 1 représente la majeure partie du volume de pierre (82%). Le faciès 2 a été observé mis en œuvre dans l'hérôon (5%). Les faciès 3, 4 et 5 n'ont pas été observés en place mais sur des blocs isolés. Cependant, l'élévation du temple devait être entièrement en « pôros » (Dyggve 1948; Vikatou *et al.* 2019) : on attribue un volume de 10 % au faciès 5 pour ne pas fausser les données, les faciès 3 et 4 restants à 1%. Le faciès 6 n'a pas été observé : il aurait été utilisé pour les tuiles et le chéneau du temple (1%).

Carrières associées : Des carrières locales du faciès 1 sont identifiées dans (Vikatou *et al.* 2019). Les autres faciès sont d'origine inconnue : le faciès 3 est potentiellement régional, mais sans preuve (n'affleure pas dans les environs directs du site). Le faciès 4 et 5 sont, au minimum, régionaux, mais plutôt allochtones : ils ne correspondent pas aux formations géologiques locales. Cependant, ils ressemblent respectivement aux faciès extraits dans la carrière de Leventochori, en Élide ([Q24](#)) et à Corinthe ([Q16](#)).



Figure 49. Le site de Kalydon : les pierres mises en œuvre.

A : le temple d'Artémis, fondations en grès. B : bloc de travertin isolé et altéré, sur le temple. C : bloc de calcaire dur, isolé, sur la terrasse du temple. D : l'hérôn, avec une assise en calcaire dur et l'élévation des murs en grès. E : le grès local. F : le calcaire bioclastique. G : le calcaire oolithique, sur un bloc errant.

- **Site 35 : Nouvelle Pleuron (38°24'51.4"N, 21°24'36.6"E)**

Type de vestige : La cité de Nouvelle Pleuron est une ville fortifiée du III^e siècle avant JC, dans laquelle on retrouve un théâtre, des citernes, et un stade en particulier ; avec une acropole fortifiée. Elle correspond à la nouvelle ville : l'ancienne ville, dans la vallée, a été détruite par les Macédoniens au III^e siècle avant JC. Non observée : l'ancienne Pleuron.

État des fouilles / études : Le site n'a pas fait l'objet de fouilles systématiques mais les vestiges découverts ont été étudiés en partie, en particulier le théâtre (Fiechter 1931). Voir le guide publié en 2009 (Kolonas, 2009).

Nombre de faciès employés : 2 faciès en place + 1 faciès non en place = **3 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire dur, local**. Calcaire massif mais fracturé, gris, légèrement karstique (**Figure 50, A**).
- Faciès 2 : **conglomérat, local**. Microconglomérat calcaire (**Figure 50, C**).
- Faciès 3 : **grès, allochtone**. Calcaire oolithique, fin, bien trié, jaune (**Figure 50, B**).

Utilisation : Le faciès 1 représente 98% du volume de pierre mis en œuvre. Les faciès 2 et 3 sont en trop petite quantité : ils représentent un volume symbolique de 1% chacun. Le faciès 2 est employé dans une base uniquement, et pour quelques blocs errants. Le faciès 3 a été observé comme bloc isolé (bloc d'architecture sculpté).

Carrières associées : Les faciès 1 et 2 sont locaux : terrassement, théâtre et citerne creusés en partie dans la roche, et des carrières sont visibles au pied de l'acropole, entre cette dernière et la ville : dans des calcaires paléocènes-éocènes ioniens. Pour le faciès 3, voir les ressemblances avec la roche extraite à Corinthe ([Q16](#)).



Figure 50. Le site de Pleuron : les pierres mises en œuvre.

A : mur d'enceinte est, en calcaire dur. B : bloc isolé en calcaire oolithique. C : microconglomérat employé pour des bases.

- **Site 36 : Élis* (37°53'33.1"N, 21°22'29.1"E)**

Type de vestige : Élis était la capitale de la région de l'Élide, mais la majorité des monuments connus ont aujourd'hui disparu, en particulier un temple d'Athéna en haut de l'acropole (tuile en marbre, au Musée). On observe aujourd'hui uniquement le théâtre, des constructions hellénistiques, deux stoas (portiques), et les fondations d'un temple (non vues, inaccessibles) (**Figure 51, A**).

État des fouilles / études : Le site a été fouillé pendant deux périodes distinctes : fouilles autrichiennes entre 1910 et 1914, puis gréco-autrichiennes entre 1960 et 1981. Aujourd'hui, ce sont majoritairement des fouilles de sauvetage et des travaux d'aménagement qui ont lieu.

Nombre de faciès employés : 1 faciès en place + 2 faciès non en place + 2 faciès isolés = **5 faciès au total**

Description des faciès :

- **Faciès 1 : calcaire tendre, local.** Lumachelle : calcaire type *floatstone*, composé majoritairement de bivalves centimétriques. Couleur blanche (**Figure 51, B**).
- **Faciès 2 : conglomérat, local.** Poudingue polygénique calcaire montrant un mauvais classement (galets ronds centimétriques jusqu'à déca-centimétriques), *clast-supported*.
- **Faciès 3 : grès fin, local (?).** Grès fin, massif, de couleur orange, non en place (**Figure 51, D**).

- Faciès 4 : **grès, régional (?)**. Grès grossier, bioclastique (morceaux de coquilles brisées, galets), tri moyen, non en place (bloc au Musée d'Élis) (**Figure 51, C**).
- Faciès 5 : **marbre, allochtone**. Blanc, au Musée (**Figure 51, E**).

Utilisation : Le site est trop peu conservé pour faire des estimations de volume significatives.

Carrières associées : Les faciès sont considérés locaux par défaut, car ils peuvent provenir de la plaine ; mais le faciès 4, observé au Musée d'Élis, ressemble à celui extrait dans les carrières de Leventochori ([Q24](#)).



Figure 51. Le site d'Élis : les pierres mises en œuvre.

A : vestiges des bâtiments hellénistiques, avec réparations modernes. B : le calcaire coquillier. C : le grès bioclastique, observé au Musée d'Élis. D : grès, bloc isolé. E : tuile en marbre du temple (?), au Musée d'Élis.

- **Site 37 : Olympie* (37°38'17.3"N, 21°37'48.0"E)**

Type de vestige : Olympie est un sanctuaire panhellénique, dédié à Zeus, où l'on trouve un temple d'Héra, un temple de Zeus, et de nombreux trésors, bases de statue et offrandes. Il n'y avait pas d'habitants fixes mais c'était un des lieux des jeux panhelléniques : en dehors du téménos (espace sacré délimité par une enceinte sacrée, le péribole), on trouve le stade, un gymnase, une palestine et des bâtiments pour accueillir les sportifs (Léonidaion).

État des fouilles / études : Le site est fouillé par le DAI depuis la fin du XIXe siècle ; voir Barringer, 2021 et références à l'intérieur.

Nombre de faciès employés : 6 faciès en place + 2 faciès non en place (?) = **8 faciès au total**

Description des faciès :

- Faciès 1 : **calcaire tendre, local**. Calcaire coquillier (pléistocène, local) employé pour presque tous les monuments, en fondation et en élévation : colonnes du Philippéion, temple d'Héra (**Figure 52, A**).
- Faciès 2 : **grès, local (?)**. Grès fin, massif et bien trié, orange, employé pour de la sculpture, des bases, généralement les assises supérieures (**Figure 52, B**).
- Faciès 3 : **calcaire dur, régional (?)**. Gris à blanc, employé pour des bases et ligne de départ du stade (**Figure 52, C**).
- Faciès 4 : **calcaire tendre, local (?)**. Observé de loin : faciès détritique, fin, blanc, employé dans les fondations d'un trésor (**Figure 52, D**).
- Faciès 5 : **grès, local (?)**. Calcaire fin, bien trié, jaune : employé pour de la sculpture, les chapiteaux du Léonidaion (**Figure 52, E**).
- Faciès 6 : **conglomérat, local (?)**. Brèche monogénique, calcaire, avec clastes décimétriques dans une matrice calcaire ou orange. Employé pour des bases (blocs errants) (**Figure 52, F**).
- Faciès 7 : **calcaire dur, allochtone (?)**. Noir, avec stylolithes, employé pour des bases de statue (**Figure 52, G**).
- Faciès 8 : **marbre, allochtone**. Blanc : soubassement du Philippéion, colonne du monument égyptien, blocs errants (**Figure 52, H**).

Utilisation : Les estimations de volume sont ici compliquées : il semble que le faciès 1 correspond à 75% du volume de roche mis en œuvre. Pour les autres faciès, le site est trop complexe pour que nos estimations soient ici bien fondées, elles nécessiteraient un travail plus approfondi.

Carrières associées : Les carrières de calcaire coquillier a été identifiées dans la littérature, mais non observées ici (Kokkorou-Alevra *et al.* 2014). La plaine a pu fournir le site dans les différents grès, conglomérats et calcaires (faciès 2, 4, 5 et 6) mais les roches dures doivent venir de plus loin (faciès 3, 7 et 8) : cependant, il n'y a pas de marbre dans la région. Le calcaire noir peut provenir du Cap Ténare (Christien 2014).



Figure 52. Le site d'Olympie : les pierres mises en œuvre.

A : colonne du temple d'Héra, en calcaire coquillier. B : base en grès orange. C : assise en calcaire dur, dans un monument. D : fondation d'un trésor, en calcaire tendre. E : chapiteau au Léonidaion, en grès fin. F : bases en brèche calcaire. G : base en calcaire noir. H : dépôts de blocs architecturaux en marbre.

3.6 Synthèse

Les données concernant les pierres employées dans les 37 sites archéologiques présentés au-dessus sont synthétisées dans le **Tableau 2**. Une représentation graphique du nombre de faciès par origine est proposée en **Figure 53**.

On observe une variété de pierres moyenne à **4,6 faciès différents** dans les sites archéologiques étudiés, mais la moitié des sites montre une diversité inférieure à 4. Il apparaît aussi que les faciès locaux sont peu diversifiés ; les faciès régionaux sont parfois absents, même quand des faciès allochtones sont importés (**Figure 53**).

Presque **90% du volume** est représenté par les faciès locaux. Cependant, on observe un grand écart-type et une médiane à 97% : la moitié des sites est composée presque à 100% de faciès locaux. Si les faciès régionaux sont absents ou très peu diversifiés, ils représentent un volume moyen (7%) plus important que les faciès allochtones (4%).

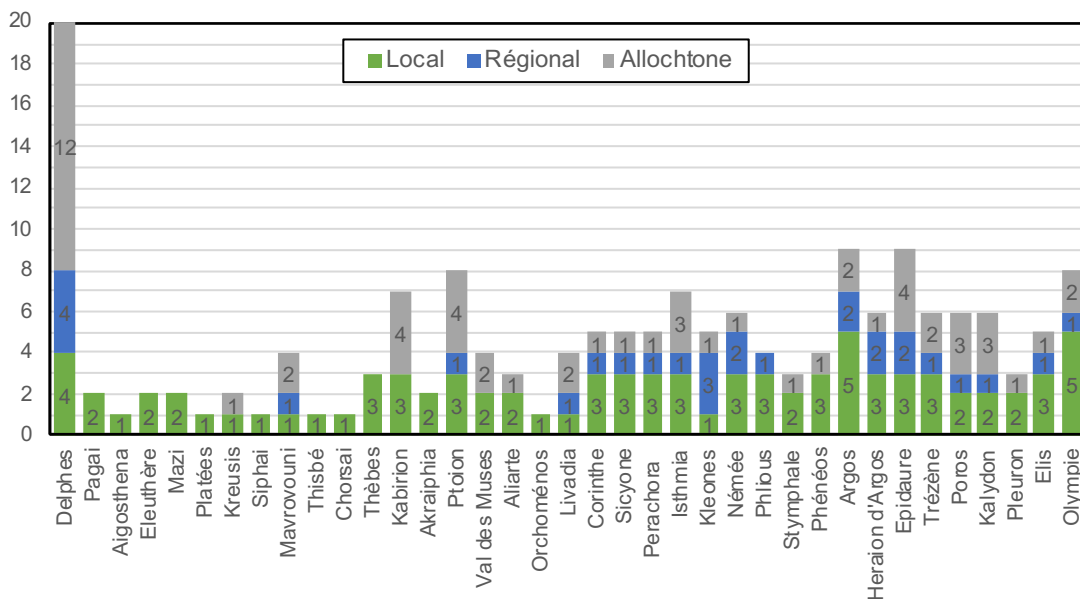


Figure 53. Diversité des roches mises en œuvre dans le Golfe de Corinthe.
L'axe des ordonnées indique le nombre de faciès.

N°	Site	Total	Faciès locaux	Faciès régionaux	Faciès allochtones	Volume local (%)	Volume reg. (%)	Volume allo. (%)
1	Delphes	20	4	4	12	33	12	55
2	Pagai	2	2	0	0	100	0	0
3	Aigosthena	1	1	0	0	100	0	0
4	Eleuthère	2	2	0	0	100	0	0
5	Mazi	2	2	0	0	100	0	0
6	Platéés	1	1	0	0	100	0	0
7	Kreusis	2	1	0	1	99	0	1
8	Siphai	1	1	0	0	100	0	0
9	Mavrovouni	4	1	1	2	93	2	6
10	Thisbé	1	1	0	0	100	0	0
11	Chorsai	1	1	0	0	100	0	0
12	Thèbes	3	3	0	0	NA	NA	NA
13	Kabirion	7	3	0	4	96	0	4
14	Akraiphia	2	2	0	0	100	0	0
15	Ptoion	8	3	1	4	97	1	2
16	Val des Muses	4	2	0	2	96	0	4
17	Aliarte	3	2	0	1	99	0	1
18	Orchoménos	1	1	0	0	100	0	0
19	Livadia	4	1	1	2	60	38	2
20	Corinthe	5	3	1	1	98	1	1
21	Sicyone	5	3	1	1	92	7	1
22	Perachora	5	3	1	1	89	10	1
23	Isthmia	7	3	1	3	87	10	3
24	Kleones	5	1	3	1	96	3	1
25	Némée	6	3	2	1	97	2	1
26	Phlious	4	3	1	0	63	37	0
27	Stymphale	3	2	0	1	99	0	1
28	Phénéos	4	3	0	1	NA	NA	NA
29	Argos	9	5	2	2	55	42	3
30	Heraion d'Argos	6	3	2	1	75	23	2
31	Epidaure	9	3	2	4	NA	NA	NA
32	Trézène	6	3	1	2	95	1	2
33	Poros	6	2	1	3	50	28	22
34	Kalydon	6	2	1	3	87	1	12
35	Pleuron	3	2	0	1	99	0	1
36	Elis	5	3	1	1	NA	NA	NA
37	Olympie	8	5	2	1	NA	NA	NA

	Total	Faciès locaux	Faciès régionaux	Faciès allochtones	Volume local (%)	Volume reg. (%)	Volume allo. (%)
Moyenne	4,6	2,3	0,8	1,5	89,2	6,8	3,9
Ecart-type	3,5	1,1	1,0	2,2	17,6	12,5	10,3
Médiane	4	2	1	1	97	0,5	1

Tableau 2. Synthèse des pierres mises en œuvre : nombre, origine et volume associé. Les cases grisées montrent qu'une valeur positive est inscrite. NA : données non déterminables. La moyenne, l'écart-type et la médiane sont indiqués pour chaque catégorie.

4 Les carrières de pierres calcaires

Sommaire

4.2 Description des carrières

4.2.1 Introduction

4.2.1 Description des carrières

[Carrières de Delphes](#) – [Carrière du Ptoion, Akraiphia](#) – [Carrière de Chorsiai](#) – [Carrière de Kreusis](#) – [Carrières de Mégare](#) – [Carrière de Perachora](#) – [Carrières de Corinthe](#) – [Carrière de Sicyone](#) – [Carrières d'Isthmia](#) – [Carrières de Kenchrées](#) – [Carrières de Kléonai](#) – [Carrières d'Argos](#) – [Carrières de Leventochori](#) – [Carrières d'Eleusis](#)

4.3 Approches pétrophysiques

4.3.1 Choix des échantillons et problématiques

4.3.2 Limitations du protocole expérimental

4.3.3 Résultats de laboratoire

[Pétrographie et minéralogie](#) – [Densité et porosité](#) – [Propriétés du réseau poreux](#) – [Mesures acoustiques](#) – [Mesures mécaniques](#)

4.4 Synthèse

4.1 Introduction

Cette partie a pour but de présenter les roches extraites de **25 carrières autour du Golfe de Corinthe (Figure 54)**. Les données sont les résultats de missions de terrain réalisées entre octobre 2019 et octobre 2021 et de travaux en laboratoire. De ces carrières, quatre faciès ont été sélectionnés pour faire l'objet d'analyses pétro-mécaniques, présentées en [4.3](#). Les résultats sont synthétisés en [4.4](#).

La première partie présente les carrières une à une. On considère comme carrière, une zone d'extraction de pierres, où sont conservées des traces d'extraction antiques et/ou qui a fourni au moins un site archéologique en matériau. Les terrassements n'apparaissent pas, ou s'ils sont restreints à une zone bien délimitée à côté des vestiges archéologiques (par exemple, à Kreusis). Comme pour les sites archéologiques, nos observations ont été réalisées sur des vestiges de carrières (carrières détruites, remplies naturellement ou par l'Homme, occupées par la végétation), laissant une grande part d'incertitude vis-à-vis du volume véritable.

La liste ne se veut pas exhaustive à l'échelle du Golfe de Corinthe, mais représentative des types de carrières et des roches extraites. En particulier, les carrières de la région de Corinthe ont déjà été bien documentées (Hayward 2003).

Chaque site sera présenté, selon la même organisation :

- Nom et bibliographie : si les carrières ont déjà été étudiées, les références consultées seront indiquées, mais la liste ne se veut pas exhaustive. La synthèse bibliographique de Kokkorou-Alevra *et al.* (2014) sur les carrières grecques n'est pas répétée ici.
- Extraction et utilisation : les carrières sont catégorisées selon l'utilisation de la pierre. On différencie l'extraction locale (la carrière fournit 1 site en matériau, sans doute en lien avec un projet de construction précis) et l'extraction pour l'exportation (la carrière fournit plus d'un site en matériau). Il y a ensuite les carrières à l'emploi inconnu : des traces antiques d'extraction sont observées, mais on ne sait pas où est employée la pierre.
- Nature de la roche extraite : description macroscopique et/ou microscopique de la roche extraite. Les faciès sont classés par type selon la classification définie préalablement (voir [2.2.1](#)).
- Caractéristiques topographiques : surface et élévation par rapport au niveau marin ; distance et dénivelé au(x) lieu(x) d'utilisation. Uniquement une estimation de la surface est présentée, en se basant sur la littérature et nos observations de terrain. Généralement, les carrières ne sont pas étudiées extensivement et les limites sont mal connues, mais le but de cette étude n'est pas d'étudier la carrière en tant qu'objet archéologique.
- Échantillons : les échantillons ont été pris dans la même unité géologique que celles extraites dans les carrières. Le numéro de l'échantillon et des lames minces associées, s'ils existent, est ici indiqué.

Le but est de remettre chaque carrière dans son contexte géologique et géographique, pour obtenir une approche globale sur les caractéristiques des carrières grecques antiques de la région étudiée. Cela a pour but de créer une *lithothèque* de référence : des échantillons macroscopiques, disponibles, décrits et référencés, pour servir de comparaison lors d'études futures sur les matériaux de construction dans la région de Corinthe.

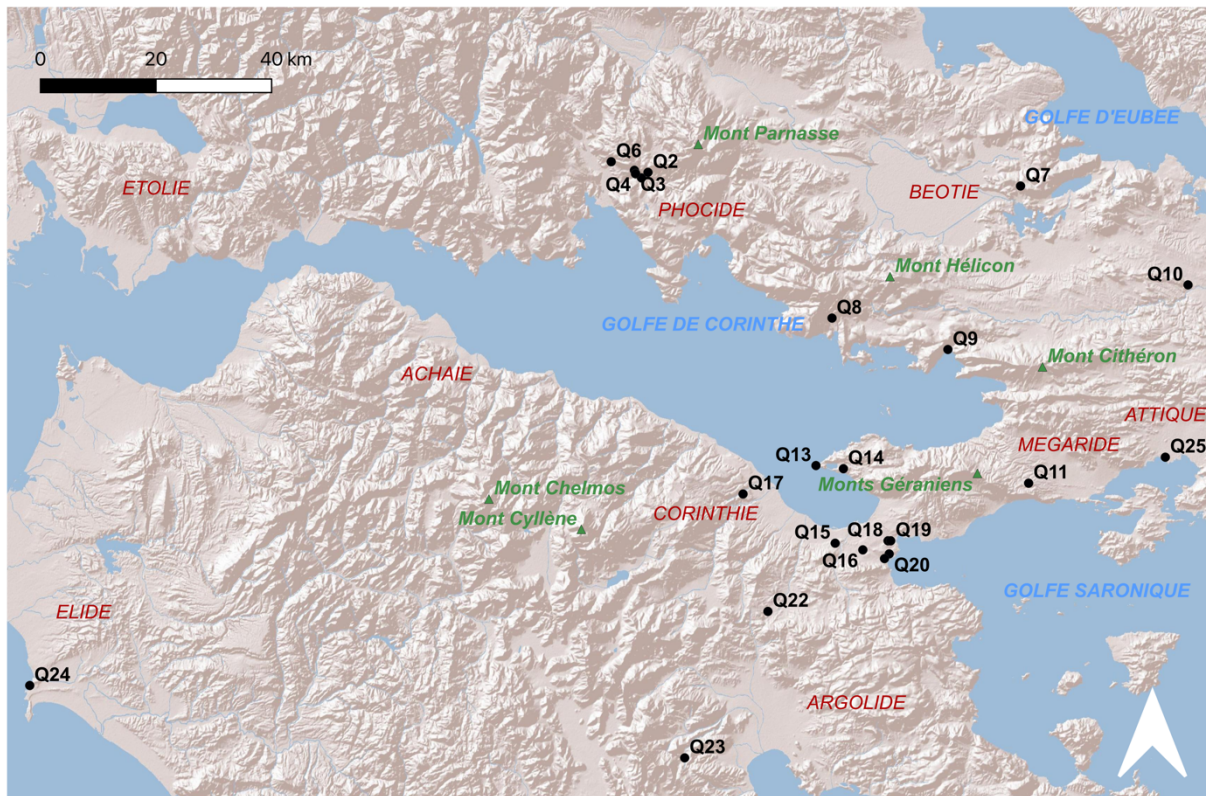


Figure 54. Carte topographique avec la position des 25 carrières étudiées.

4.2 Description des carrières antiques

- Q1 : Carrière du stade, à Delphes ($38^{\circ}29'1.12''\text{N}$, $22^{\circ}29'47.58''\text{E}$)

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes, la carrière est située en amont du stade antique de Delphes, qui lui donne son nom (Amandry 1981; Perrier *et al.* 2022).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Calcaires type *packstone* à *wackstone*, karstique, de couleur grise, datés du Jurassique-Crétacé. Voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.2.1 \(Figure 55\)](#).

Caractéristiques topographiques : La carrière s'étend sur une surface d'environ 300 m² au minimum (non délimitée), et se situe à 740 mètres d'altitude, à une distance d'environ 150 mètres de son lieu d'utilisation (50 mètres de dénivelé).

Échantillons : E25, DEL-118.

- **Q2 : Carrière de Logari, à Delphes (38°28'49.61"N, 22°31'23.21"E)**

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes, les traces d'extraction ont été repérées au lieu-dit Logari, qui lui donne son nom (Amandry 1981; Perrier *et al.* 2022).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Faciès similaire à Q1 : voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.2.1](#) (**Figure 55**).

Caractéristiques topographiques : La carrière s'étend sur une surface approximative de 400 m², à une altitude de 570 mètres, et distant de 1,9 km de son lieu d'utilisation (avec un dénivelé presque nul).

Échantillons : IM_GR_21_2

- **Q3 : Carrières de Philoménos A, à Delphes (38°28'42.78"N, 22°29'55.64"E)**

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes, carrière non documentée (identifiée sur le plan anonyme trouvé à Delphes, extrait présenté dans la **Figure 11**).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Brèche de pente monogénique, matrice orange, quaternaire. Voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.2.4](#) (**Figure 55**).

Caractéristiques topographiques : La zone d'extraction observée s'étend sur une surface d'environ 500 m², mais elle doit être significativement plus grande ; à une altitude de 570 mètres (dénivelé presque nul), elle est distante de moins de 200 mètres du site.

Échantillons : DEL_120.

- **Q4 : Carrières de Philoménos B, à Delphes (38°28'41.88"N, 22°29'54.79"E)**

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes, la carrière est non documentée (identifiée sur le plan anonyme trouvé à Delphes, extrait présenté dans la **Figure 11**).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Calcaire à rudistes, sombre et massif, du Crétacé supérieur. Voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.2.3](#) (**Figure 55**).

Caractéristiques topographiques : la zone d'extraction s'étend sur environ 200 m² au minimum, elle se situe à 560 mètres d'altitude (dénivelé nul), à 500 mètres de Delphes.

Échantillons : DEL_115 ; E24 et échantillons associés.

- **Q5 : Carrières du Pléistocène à Delphes (38°28'20.1"N, 22°30'30.5"E)**

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes : elle a été identifiée pour la première fois en 2021 lors d'une mission de terrain.

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#))

Nature de la roche extraite : **travertin**. Tuf calcaire, grossier et macro-poreux, tubulaire (racines, feuilles). Voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.3.1](#) (**Figure 55**).

Caractéristiques topographiques : la surface identifiée est d'environ 500 m², elle se situe à une altitude de 200 mètres et à 1,4 km de son lieu d'utilisation (dénivelé de 400 mètres en montée).

Échantillons : IM_GR_21_9 et échantillon associé.

- **Q6 : Carrières de Saint-Élie à Delphes (38°29'48.28"N, 22°27'4.52"E)**

Nom et bibliographie : En Phocide, près de Delphes, elles sont nommées d'après le monastère de Saint-Élie, qui se situe au-dessus (Amandry 1981).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé à Delphes uniquement ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Calcaire massif, gris clair, type *mudstone*, du Maastrichtien. Voir le chapitre sur Delphes pour une description plus précise : [5.3.2](#) (**Figure 55**).

Caractéristiques topographiques : la surface exploitée recouvre environ 10 500 m², pour un volume estimée extrait de 15 600 m³ (Papageorgakis & Kolaiti 1992). Elle se situe à une altitude de 230 mètres (350 mètres de dénivelé) et à 5 kilomètres de son lieu d'utilisation.

Échantillons : E15, Del.20.1, DEL_112 et échantillons associés.

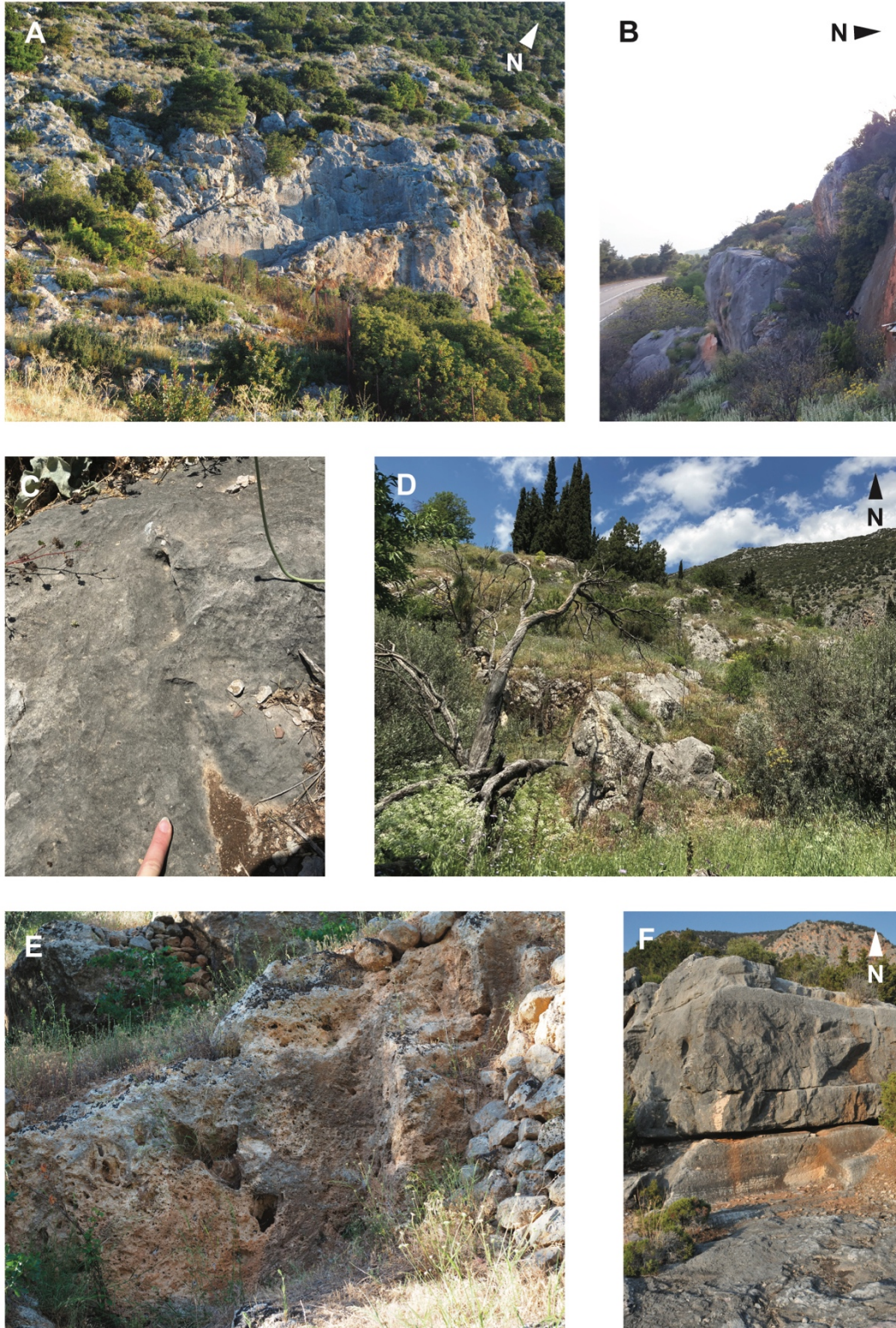


Figure 55. Les carrières de Delphes.

A : la carrière du Stade (Q1). B : la carrière de Logari (Q2). C et D : la carrière de Philomélos (Q3 et Q4), avec trace d'extraction dans le calcaire à rudistes. E : la carrière du Pléistocène (Q5). F : les carrières de Saint-Elie (Q6).

- **Q7 : Carrière du Ptoion à Akraiphia (38°27'33.73"N, 23°15'7.96"E)**

Nom et bibliographie : En Béotie, carrière située dans le sanctuaire du Ptoion (Guillon 1936).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé pour le site du Ptoion uniquement ([site n°15](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire tendre**. De couleur blanche / beige, c'est un faciès détritique fin, très peu consolidé, qui présente une stratification avec des horizons plus compacts indurés et d'autres meubles, avec une composante clastique (quelques éléments plus gros, d'1 cm maximum, argileux). Composé de calcite, kaolinite, quartz détritique, il se présente en lame mince comme un faciès très bioturbé, avec quelques éléments détritiques (lithoclastes), composé d'une micrite et d'un remplissage des cavités par une sparite mal cristallisée (**Figure 56**). Il a été extrait des flysch sub-pélagoniens paléocènes-éocènes qui affleurent dans le site (Pagounis *et al.* 1988).

Caractéristiques topographiques : La surface exploitée s'étend approximativement sur 100 m² (non estimable, très faible conservation des traces d'extraction à cause de la nature de la roche). Elle se trouve à une altitude de 380 mètres mais à 50 mètres de son lieu d'utilisation (0 mètre de dénivelé).

Échantillons : Pt-20-2 et échantillon associé.

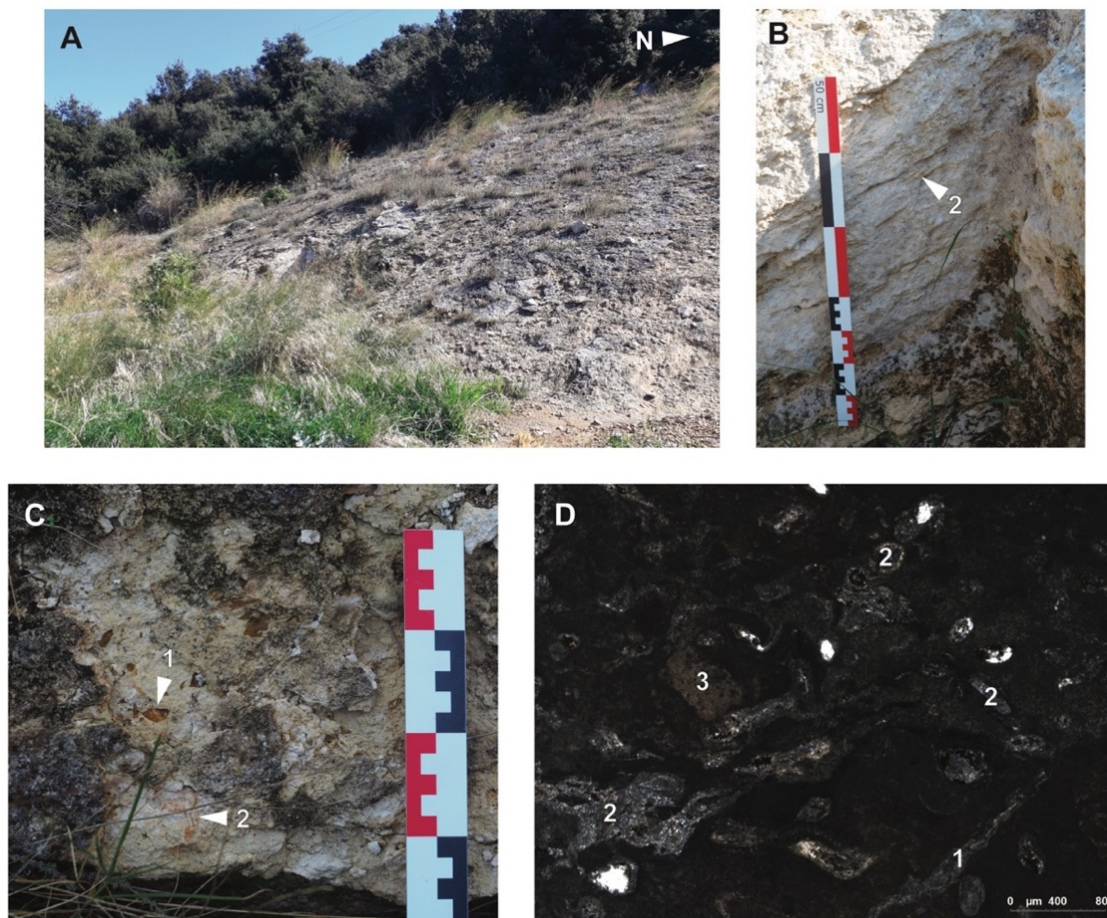


Figure 56. La carrière du Ptoion, Akraiphia.

A : vue de la « carrière », affleurement au nord du temple d'Apollon Ptoos. B : trace d'extraction, angle d'un bloc mais pas de traces conservées ; coupe avec la stratification et les horizons bioturbés (2). C : zoom sur la roche avec des éléments détritiques (1) et les traces de bioturbations (2). D : Lame mince Pt-20-2, cavités remplies de sparite (2) et lithoclastes (3).

- **Q8 : Carrière de Chorsiai (38°15'23.41"N, 22°53'0.35"E)**

Nom et bibliographie : En Béotie, sur le site de Chorsiai, elle a été relevée et datée de la période hellénistique (Fossey & Morin 1986).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé pour le site de Chorsiai uniquement ([site n°11](#)).

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Brèche calcaire monogénique, peut-être de faille (non cartée : chevauchement entre calcaire crétaé supérieur / trias-jurassique (Papastamatiou *et al.* 1971)). Elle présente un aspect massif, de couleur grise ; l'altération cache l'aspect

conglomératique, et le très mauvais classement (1 mm à décamétrique) des clastes anguleux (60%) dans une matrice micritique calcaire dense. Faible porosité inter-particulaire (**Figure 57**).

Caractéristiques topographiques : La carrière s'étend sur une surface approximative de 5 000 m², à une altitude de 250 mètres, mais elle se trouve à 50 mètres de son lieu d'utilisation (dénivelé nul).

Échantillons : Kh.20.2 et échantillon associé.

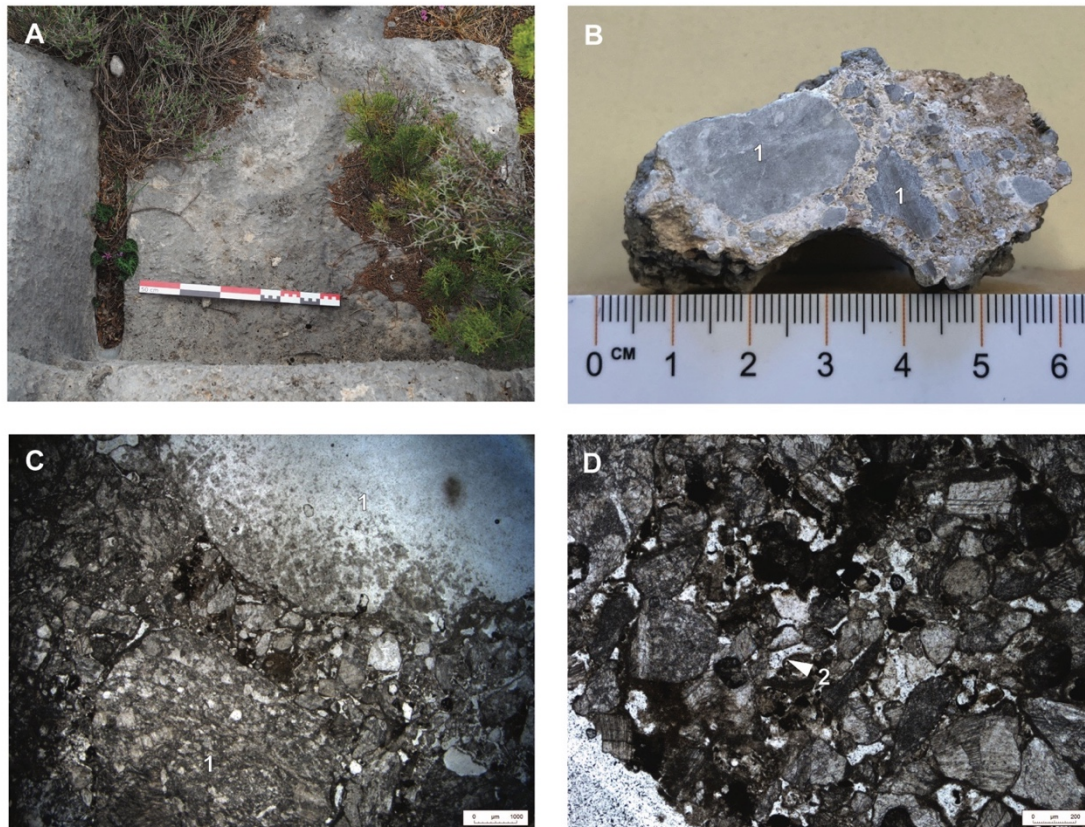


Figure 57. La carrière de Khorsiai.

A : trace d'extraction, angle de bloc et tranchée. B : échantillon macroscopique, coupe fraîche avec clastes (1) et matrice. C et D : vues microscopiques de l'échantillon Kh.20.2, avec les clastes calcaires (1) et la porosité inter-particulaire (2)

- **Q9 : Carrière de Kreusis, à Livadostra (38°12'28.48"N, 23° 6'37.26"E)**

Nom et bibliographie : En Béotie, sur le site de Kreusis, la carrière a été relevée (Roesch & Argoud 1985).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau est employé pour le site de Kreusis uniquement ([site n°7](#)).

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Brèche, à l'aspect massif, datée du Pléistocène (Bornovas 1984) (**Figure 58**). Elle provient de dépôts fluvio-terrestres : bancs métriques, clastes anguleux pluri-centimétriques dans matrice calcaire orange, l'unité peut atteindre jusqu'à 50-80 mètres d'épaisseur, localisée dans la vallée de Livadostra.

Caractéristiques topographiques : Elle s'étend sur une surface approximative d'environ 3000 m², à une altitude de 20 mètres, à côté de son lieu d'utilisation (dénivelé nul).

Échantillons : non.



Figure 58. La carrière de Kreusis.

A : vue générale de la carrière, à flanc de montagne. B : tranchée, qui semble avoir pris avantage d'une fracture de matériau argilo-calcaire. C et D : texture bréchique de la roche, mis en œuvre avec les traces de coins restants (C) et dans la carrière (D).

- **Q10 : Carrières de Tanagra (38°18'22.77"N, 23°34'51.68" E)**

Nom et bibliographie : En Béotie, les carrières ont été identifiées après la prospection de la ville antique de Tanagra en 1985 (Roller 1987).

Extraction et utilisation : le faciès a été utilisé à Tanagra même (non étudié, mais des vestiges de la fortification en calcaire noir se trouvent proche de la carrière), et hypothétiquement pour des stèles exportées dans la région (voir au musée de Thèbes, [site n°12](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Couleur noir, massif, avec de nombreuses veines de calcite millimétriques et des micro-fracturations. De type *mudstone*, avec quelques joints stylolithiques, on remarque l'absence de faune dans une micrite très homogène (**Figure 59**). Elle est datée du Trias moyen à supérieur (Tsodoulos *et al.* 2008).

Caractéristiques topographiques : Les carrières n'ont pas pu être observées dans leur intégralité, et les données ne sont pas suffisantes pour donner une estimation de la surface. Elles se trouvent sur le pourtour d'une colline de 200 mètres d'altitude, à 500 jusqu'à 1 km de son lieu d'utilisation principal (Tanagra), mais il a pu être transporté sur plus de 20 kilomètres (Thèbes).

Échantillons : Ta.22.1 et échantillon associé.

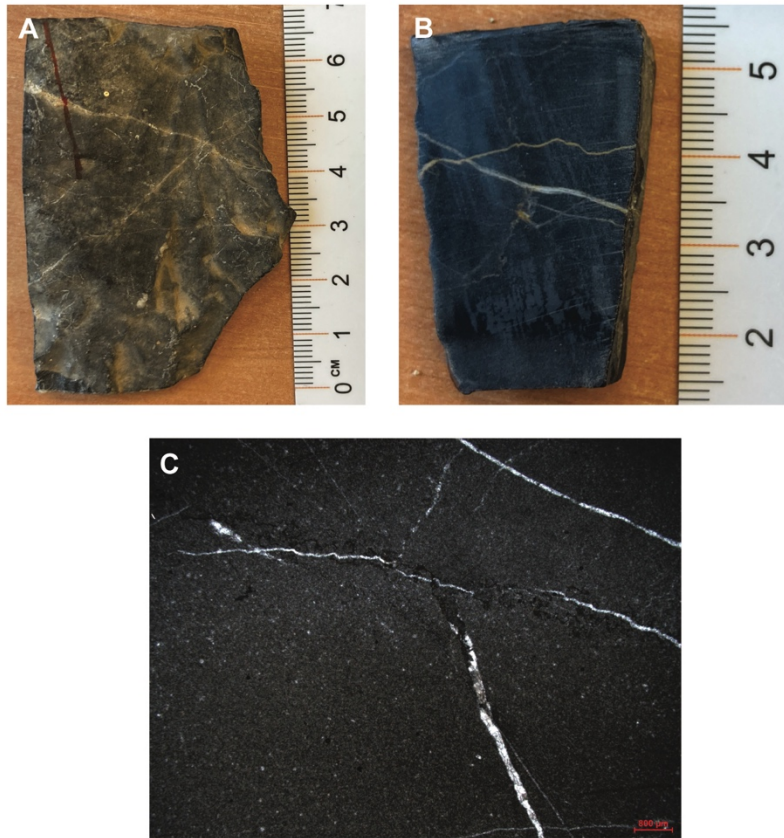


Figure 59. La carrière de Tanagra.

A et B : échantillon macroscopique de Ta.22.1, face brute, et face polie, où l'on peut voir les veines de calcite. C : vue microscopique, avec l'absence de faune.

- **Q11 : Carrière de Mégare A (38° 0'7.99"N, 23°16'5.02"E)**

Nom et bibliographie : En Mégaride, elle a été découverte lors d'une mission de terrain en 2020.

Extraction et utilisation : le faciès extrait n'a pas été observé mis en œuvre dans un site.

Nature de la roche extraite : **calcaire tendre**. Deux sous-faciès observés à l'affleurement.

Faciès 1 : calcaire fin à gastéropodes (fusiforme, petite taille, canellés) ; blanc, léger, friable et peu consolidé. C'est un calcaire type *packstone-grainstone* composé de peloides, matrice microsparitique, rares fragments de bioclastes, porosité inter-particulaire et cavités (bioturbation, dissolution de coquilles) (**Figure 60**, B et D). Faciès 2 : calcaire jaune friable, de type *grainstone* bien trié, composé à 70% d'éléments figurés (peloides, bioclastes), faible cimentation avec sparite fibreuse, porosité importante inter-granulaire (**Figure 60**, C et E).

Caractéristiques topographiques : La zone d'extraction s'étend sur une surface approximative de 200 m², mais les limites n'ont pas été observées (potentiellement plus grand). Elle se situe dans les contreforts des Monts Géraniens, à 360 mètres au-dessus du niveau marin, dans une vallée à environ 7 kilomètres de la côte du Golfe Saronique.

Échantillons : Mg.20.1, Mg.20.2 et échantillons associés.

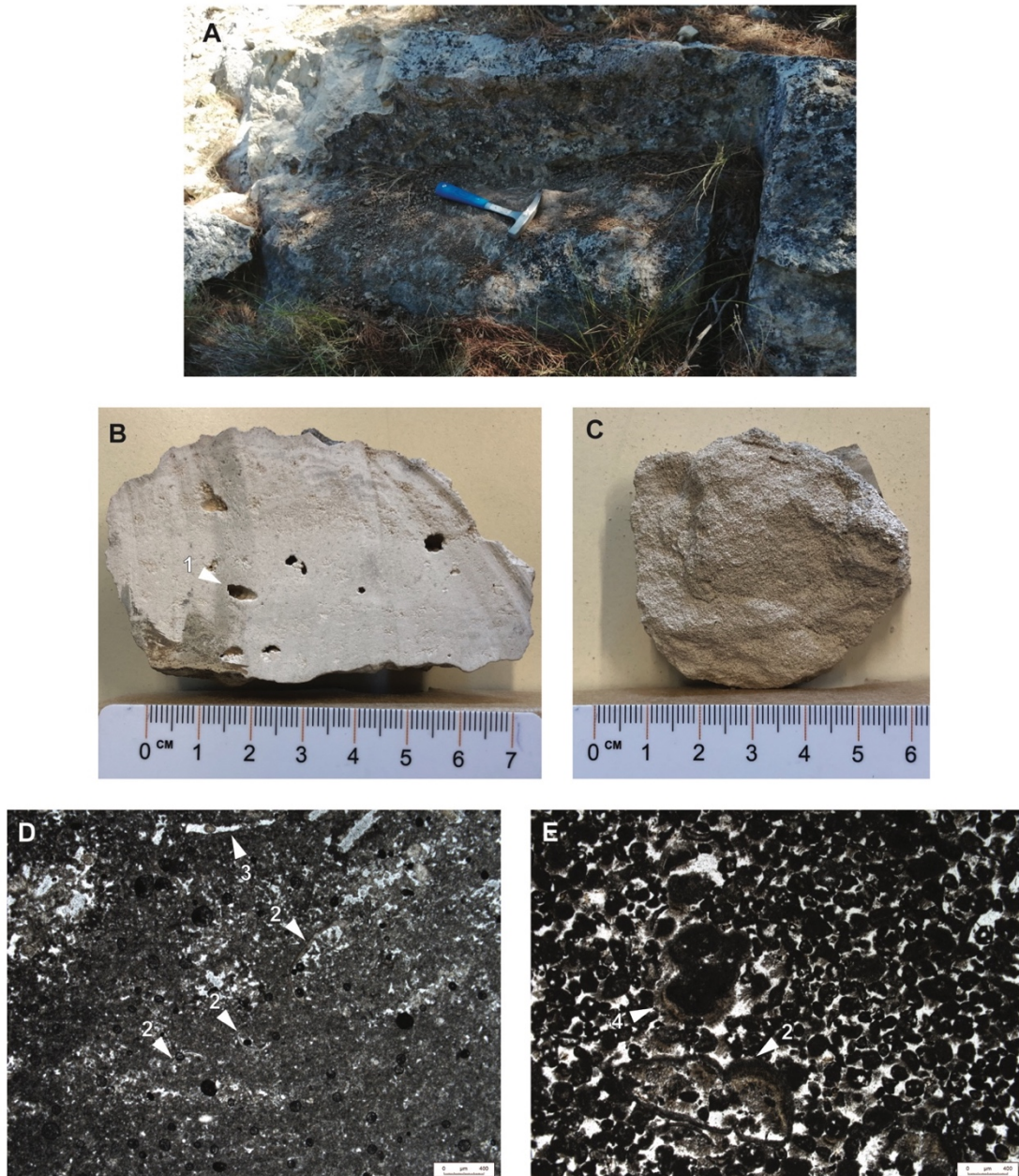


Figure 60. Les carrières de Mégare A.

A : empreinte d'un bloc extrait, avec la trace de la tranchée. B : échantillon du calcaire à gastéropodes (1). C : échantillon du calcaire grossier. D : vue microscopique de Mg.20.1, avec bioclastes (2) et cavités (3) dans une matrice à péloïdes. E : vue microscopique de calcaire grossier, avec bioclastes (2) et péloïdes, et matrice sparitique (4).

- **Q12 : Carrière de Mégare B* (X,X)**

Nom et bibliographie : En Mégaride, les « carrières de Mégare » sont mentionnées dès l'Antiquité (voir Beck et Smith, 2018, pour la traduction du texte de Pausanias mentionnant la pierre de Mégare), elles sont connues mais n'ont pas fait l'objet de publication : la position exacte n'a pas été retrouvée.

Extraction et utilisation : Les carrières non pas été retrouvées, mais le faciès que l'on retrouve dans la région a été employé à Mégare même, mais aussi exporté : à Delphes (voir [5.5.4](#)), Pagai ([site n°2](#)), Aigosthènes ([site n°3](#)), Kreusis ([site n°7](#)); faciès similaire au Kabirion de Thèbes ([site n°13](#)), à Argos ([site n°29](#)), Trézène ([site n°32](#)), Kalaurie ([site n°33](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire tendre**. Calcaire coquillier composé à plus de 50% de fossiles (plusieurs types de bivalves : 3-4 cm de forme ovale, valves équilatérales, côtes radiales, commissure crénelée ; <1 cm de forme ovale allongée, valves inéquilatérales, côtes concentriques, commissure lisse), et quelques gastéropodes. On observe une dissolution de la coquille dans 80% des cas, créant une forte porosité (32,1%) avec des méga-pores. Densité de 1,75. En lame mince, c'est un *grainstone* avec 20% d'éléments figurés millimétriques (fragments et coquilles entières) dans une phase plus fine, composée de peloïdes (200 µm), très mal cimentée par une sparite fibreuse. Porosité inter-granulaire et fenestrale (**Figure 61**).

Caractéristiques topographiques : x.

Échantillons : Mg.20.3 et échantillon associé.

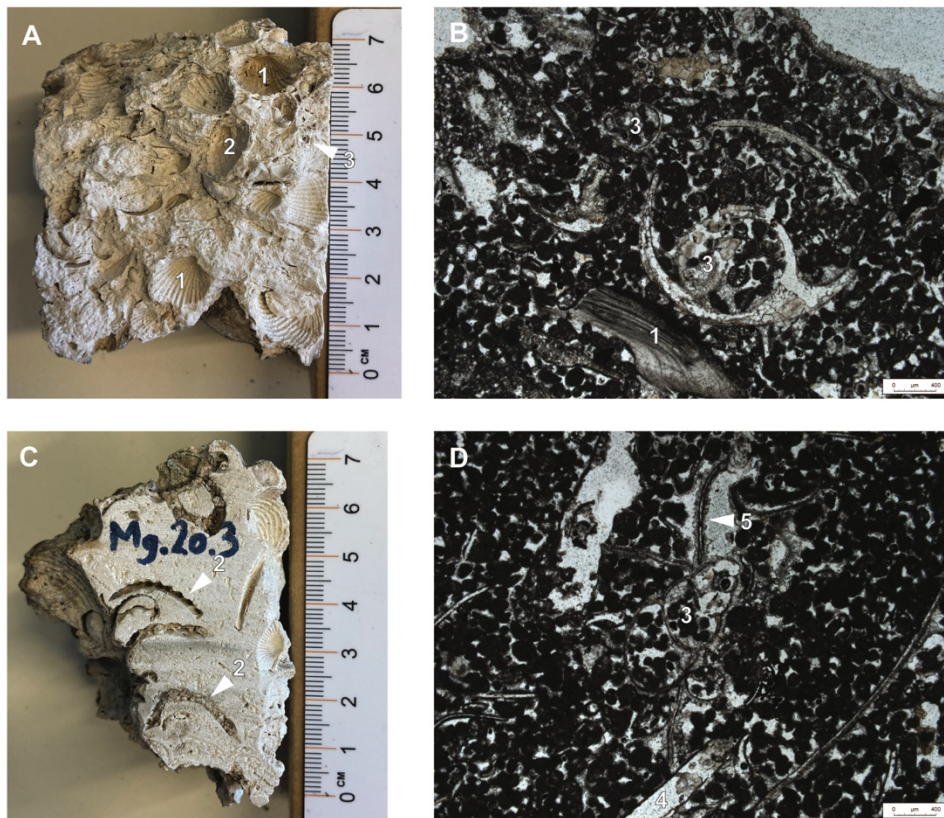


Figure 61. La carrière de Mégare B.

A et C : échantillons Mg.20.3, face cassée et face découpée à la scie, avec les empreintes de bivalves crénelés (1) et lisses (2) ; B et C, vues microscopiques avec fragments de bivalves (1), gastéropodes (3) ; porosité fenestrale (4) et sparite fibreuse (5)

- **Q13 : Carrière du Cap de l'Héraion, Perachora (38° 1'47.97"N, 22°51'9.52"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, sur la péninsule de Perachora, ces carrières n'ont pas été documentées avant la mission de 2020 : des traces d'extraction avaient été identifiées mais plus à l'ouest, au niveau de la plaine (Tomlinson 1969).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau a été employé pour le sanctuaire de Perachora uniquement ([site n°22](#)).

Nature de la roche extraite : **travertin**. Stromatolithe. Voir la description en [4.3.3 \(Figure 62\)](#).

Caractéristiques topographiques : La surface estimée de l'exploitation est de 20 000 m², sur la côte (élévation 0 mètre), elle se situe à 100 mètres de son lieu d'utilisation (dénivelé nul).

Échantillons : PE.A et échantillons associés.

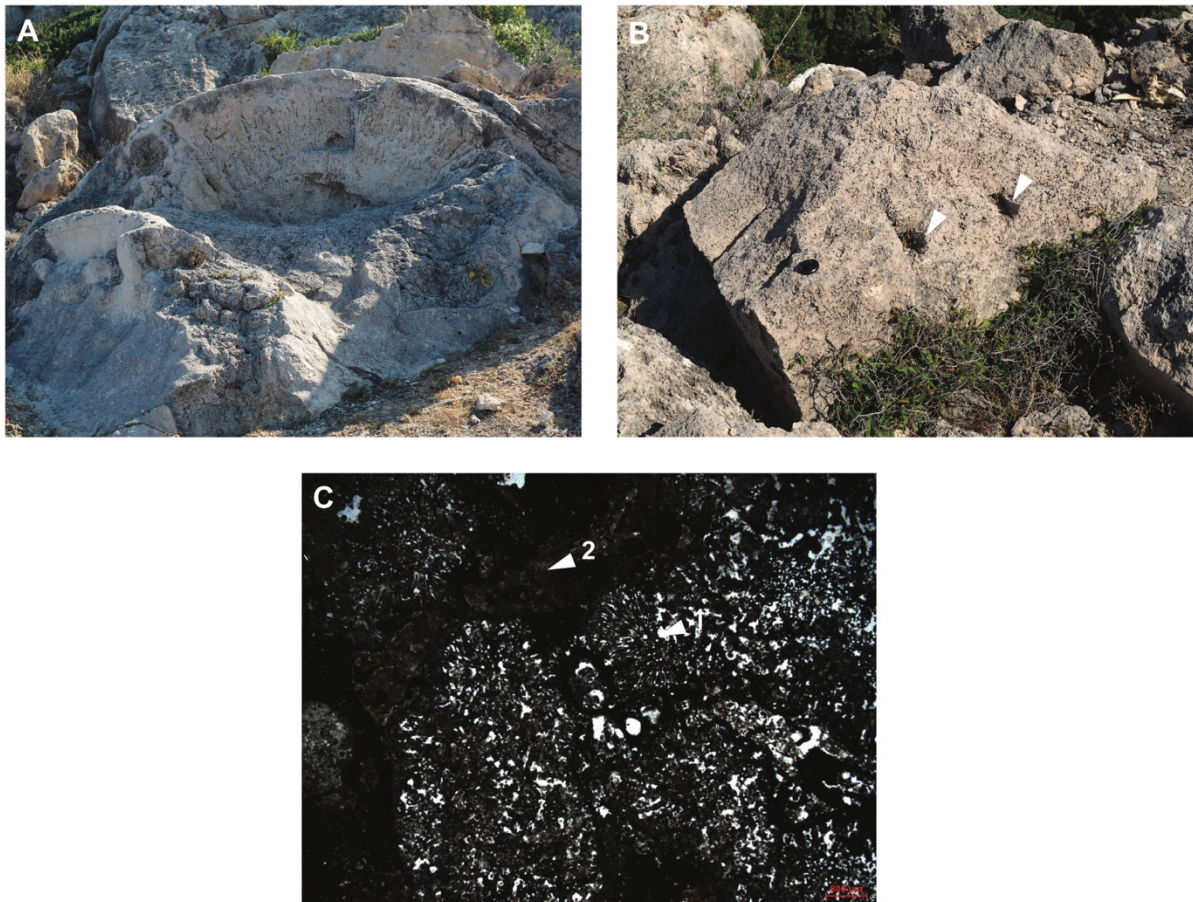


Figure 62. La carrière de Perachora.

A : stromatolithe ouvert, peut-être par l'action de l'Homme. B : bloc abandonné avec traces d'extraction (flèche). C : vue microscopique de PE.A, avec les sections transverses des colonies de *Rivularia* qui forment les biohermes.

- **Q14 : Carrière du Lac, à Perachora (38° 1'28.49"N, 22°54'19.55"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, sur la péninsule de Perachora, la carrière a été identifiée par (Chiotis *et al.* 2012) et se trouve à l'est du Lac.

Extraction et utilisation : ce site d'extraction n'a pas été associé à un site archéologique (peut être Perachora ?)

Nature de la roche extraite : **calcaire tendre**. Calcaire bioconstruit, récifal avec dépôts détritiques (péloïdes, fragments de bivalves, équinodermes, miliolles). Très peu cimentée par une microsparite, il présente une forte porosité de type inter-particulaire et fenestrale, de l'ordre de 30 à 40% (**Figure 63**). Age Tyrrhénien (130-115 ka).

Caractéristiques topographiques : La surface extraite recouvre environ 2000 m² observés, au minimum, mais (Chiotis *et al.* 2012) estiment environ 4 hectares (40 000 m²). Il se situe 100 mètres au-dessus du niveau marin, et à 4,5 km de l'Héraion.

Échantillons : Pe.19.1 et échantillon associé.

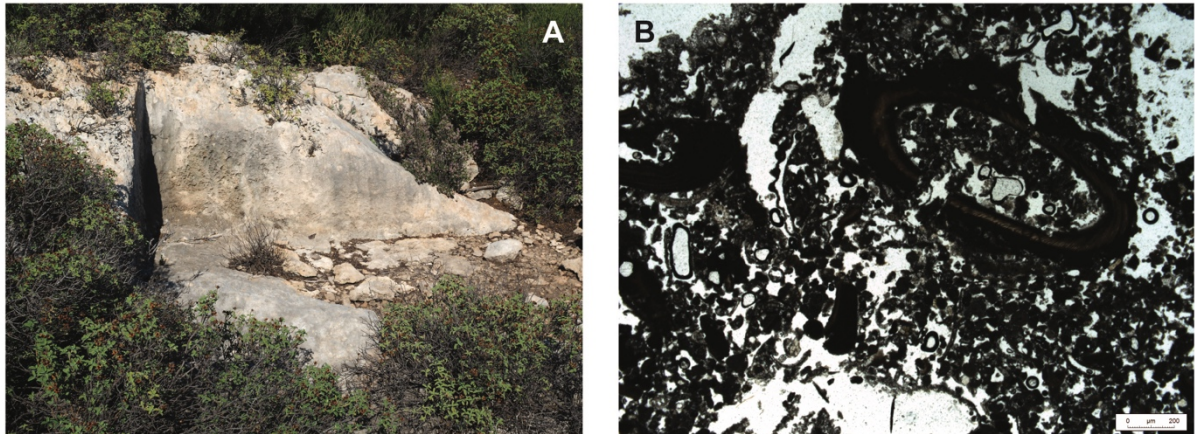


Figure 63. La carrière du Lac de Perachora.

A : trace d'extraction (angle). B : vue microscopique de Pe.19.1 : entre les polypes (non présents sur la photo), remplissage plus fin détritique (peloïdes, bioclastes)

- **Q15 : Carrière de conglomérat, Corinthe (37°54'34.63"N, 22°53'23.02"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, près de la ville de l'Ancienne Corinthe, la carrière est identifiée dans Hayward (2003).

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau semble être employé uniquement à Corinthe ([site n°20](#)).

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Poudingue polygénique de la terrasse marine « du Temple » (Sébrier 1977), *clast-supported*, composé de clastes de calcaires et radiolarites pluricentimétriques avec un classement grossier (**Figure 64**, A).

Caractéristiques topographiques : La surface d'extraction est inférieure à 2000 m² mais les limites sont mal définies. A une altitude de 80 mètres, la carrière se situe à moins d'1 km de son lieu d'utilisation (dénivelé nul).

Échantillons : non.

- **Q16 : Carrières d'Examilia, Corinthe (37°54'03.1"N, 22°56'47.8"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, les carrières s'étendent sur presque 3 kilomètres à l'est de la ville d'Examilia, qui lui a donné son nom. Elles sont identifiées depuis longtemps et ont fait l'objet d'une étude approfondie (Hayward 1996, 2003).

Extraction et utilisation : la roche a été utilisée localement sûrement, mais elle est connue pour avoir été exportée : dans la région, à Sicyone ([site n°21](#)), Perachora ([site n°22](#)) et Isthmia ([site n°23](#)) ; à Delphes ([site n°1](#)) ; peut-être à Kléonai ([site n°24](#)), Némée ([site n°25](#)) et Phlious ([site n°26](#)), à Épidaure ([site n°31](#)) ; hypothétique pour Mavrovouni ([site n°9](#)), Kalydon ([site n°34](#)), Pleuron ([site n°35](#)).

Nature de la roche extraite : **grès**. Dune oolithique. Voir la description en [4.3.3](#) (**Figure 64, C**).

Caractéristiques topographiques : Les carrières s'étendent sur une surface de plus de 100 000 m², pour un volume extrait de presque 1 million de m³ (Hayward 1994). Elles se trouvent à environ 80 mètres d'altitude et à 5 km des côtes, mais elle est exportée à plus de 50 km.

Échantillons : EX.A, EX.B, EX.C, EX.D, EX.E ; EX.19.1 à 7 et échantillons associés.

- **Q17 : Carrière du stade, Sicyone (37°59'7.36"N, 22°42'32.30"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, au nord-ouest du stade antique de Sicyone, la carrière est identifiée et décrite dans (Lolos 2021).

Extraction et utilisation : extraction locale, pour l'agora de Sicyone ([site n°21](#))

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Poudingue polygénique, composé de galets de calcaires centimétriques, sur une épaisseur de quelques mètres montrant une variabilité : parfois *clast-supported* à gros galets, parfois *mud-supported* fin avec stratification (**Figure 64, B**).

Caractéristiques topographiques : Elle se trouve à 100 mètres du site, à une altitude de 200 mètres en haut de la formation géologique (dénivelé de maximum 40 mètres).

Échantillons : non.

- **Q18 : Carrière de Rachi, à Isthmia (37°54'46.75"N, 22°59'33.68"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, sur le promontoire nommé Rachi à côté d'Isthmia, on observe des habitations hellénistiques avec nombreuses traces de terrassement et d'exploitation de la pierre (Anderson-Stojanović 1996).

Extraction et utilisation : extraction locale, pour Isthmia ([site n°23](#)).

Nature de la roche extraite : grès. Calcaire grossier, dune de sable bien trié, qui présente une stratification plane, polygénique (clastes anguleux de calcaire, radiolarite) (Figure 64, D et E).

Caractéristiques topographiques : Le site s'étend sur surface approximative de 1000 m², à 95 mètres d'altitude (en haut de la colline, dénivelé de 45 mètres) et à environ 200 mètres du site.

Échantillons : non.



Figure 64. Carrières de la région de Corinthe.

A : les conglomérats de l'est de Corinthe, polygénique, issus de la terrasse marine. B : conglomérats de la carrière du stade, Sicyone, issus aussi d'une terrasse marine. C : les carrières d'Examilia, front de taille antique. D et E : le site de Rachi, zoom sur le grès fin stratifié, et traces d'extraction antiques.

- **Q19 : Carrière du Stade, à Isthmia (37°54'47.42"N, 22°59'53.50"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, près du stade antique d'Isthmia, la carrière n'est pas documentée.

Extraction et utilisation : extraction locale, le matériau a été employé à Isthmia ([site n°23](#)).

Nature de la roche extraite : **conglomérat**. Horizon conglomératique avec classement variable : poudingue *clast-supported*, composé de clastes centimétriques ronds, à des faciès plus fins type grès conglomératique, avec un mauvais classement : 50% d'ooïdes (maj. micritiques, quelques circulaires, rondes, bien classées), 50% de lithoclastes millimétriques à centimétriques (quartz mud-coated, albite), dans une matrice sparitique très bien cimentée (densité assez forte). Il présente une porosité intergranulaire faible (**Figure 65**).

Caractéristiques topographiques : Des traces se retrouvent sur environ 500 m² mais l'étendue doit être plus grande. Elle se situe à 70 mètres d'altitude (20 mètres au-dessus de la plaine, de dénivelé) et à 500 mètres de son site d'utilisation.

Échantillons : Is.20.2 et échantillon associé.

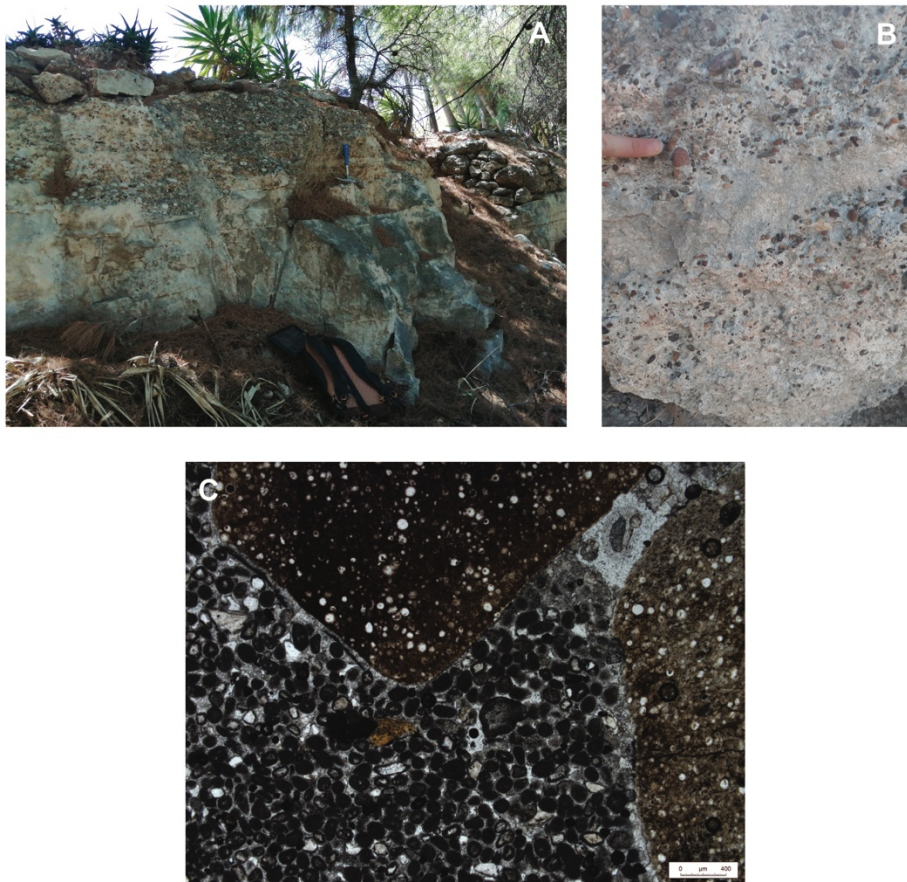


Figure 65. Carrière du Stade d'Isthmia.

A : vue de l'affleurement, montrant des hétérogénéités à l'échelle de l'unité. B : zoom sur la roche, massive, avec des passes conglomératiques plus fines. C : vue microscopique, matrice à oïdes entre les lithoclastes centimétriques.

- **Q20 : Carrière de Kenchrées A (37°53'34.65"N, 22°59'42.57"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthe, près de la ville de Kenchrées, la carrière a été identifiée par Hayward (2003).

Extraction et utilisation : non observé dans la construction, il a peut-être été employé à Isthmia ([site n°23](#)).

Nature de la roche extraite : **grès**. Calcaire gris-jaune de type *packstone*, hétérogène : classement moyen avec >25% d'éléments allochtones gros (lithoclastes, bioclastes, gastéropodes) et des éléments plus petits (peloïdes et oïdes moyennement rondes, 2 à 3

laminations, cortex hétérogènes), dans une matrice microsparitique. Il présente une porosité moldique et interparticulaire assez forte (20-30 %) (**Figure 66**, A, B et C).

Caractéristiques topographiques : La carrière s'étend sur au moins 40 000 m², à une altitude de 85 mètres et à 600 mètres de la côte ; elle se situe à 2,5 km d'Isthmia.

Échantillons : Ke.19.2, Ke.19.3 et échantillons associés.

- **Q21 : Carrière de Kenchrées B (37°53'8.42"N, 22°59'42.57"E)**

Nom et bibliographie : En Corinthie, près de la ville de Kenchrées, elle a été identifiée par Hayward (2003).

Extraction et utilisation : non observé dans la construction, il a peut-être été employé à Isthmia ([site n°23](#)).

Nature de la roche extraite : grès. Calcarénite impure (voir en [4.4.3](#)) (**Figure 66**, D et E).

Caractéristiques topographiques : La carrière s'étend sur une surface d'environ 30 000 m², à 30 mètres d'altitude et 600 mètres du port de Kenchrées.

Échantillons : KE.A ; Ke.19.1 et échantillon associé.

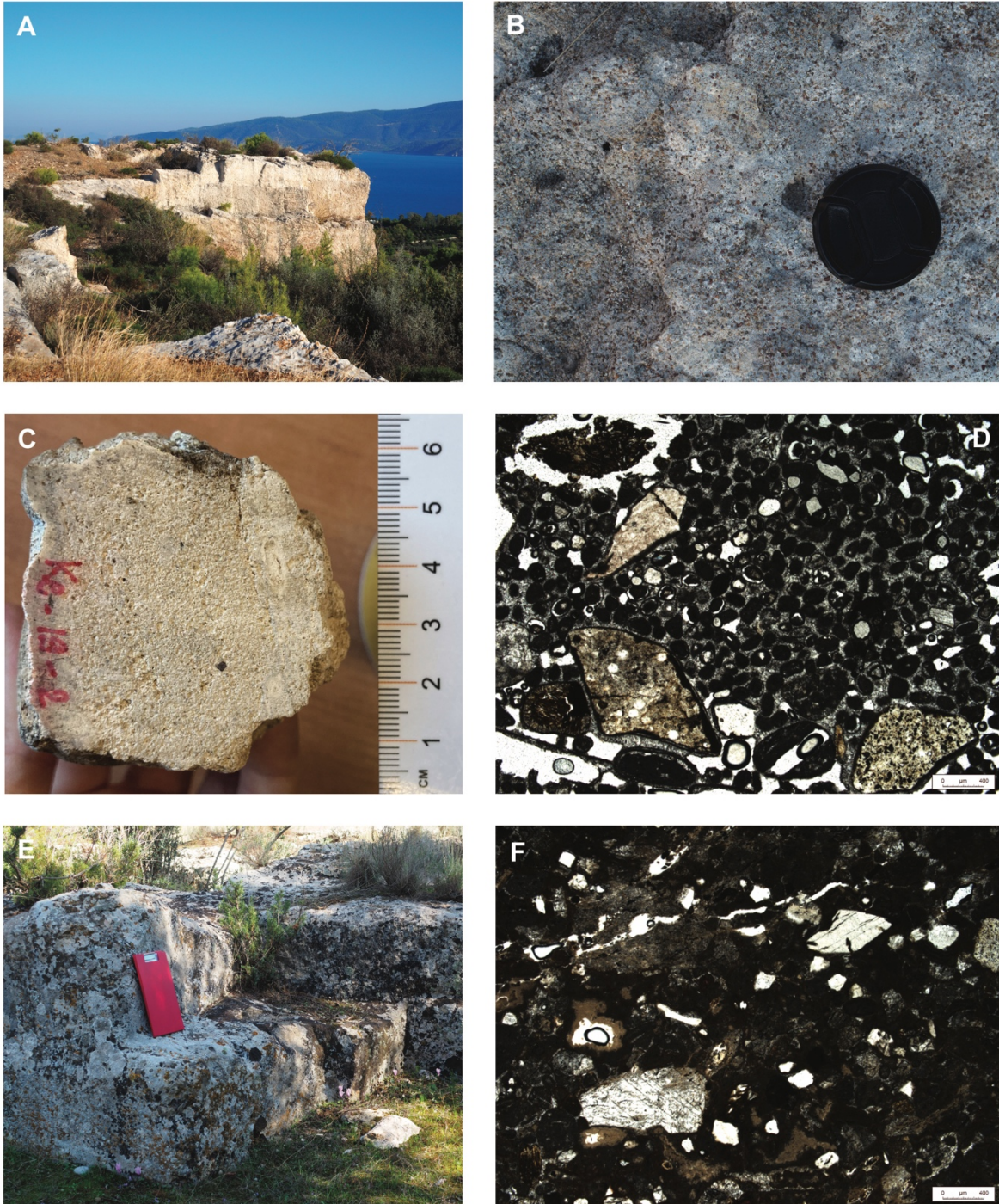


Figure 66. Les carrières de Kenchrées.

A et B : Kenchrées A, traces d'extraction et zoom sur l'affleurement de grès conglomératique. C : échantillon Ke.19.2, surface coupée. D : vue microscopique de Ke.19.2, *packstone* détritique avec ooïdes et lithoclastes. E et F : la carrière de Kenchrées B, trace d'extraction et vue microscopique de la calcarénite impure, faciès détritique avec lithoclastes dans une micrite.

- **Q22 : Carrières de Kléonai (37°48'14.37"N, 22°45'27.98"E)**

Nom et bibliographie : Au sud de la Corinthie, les carrières de Kléonai sont proches de la cité de Kléonai, qui lui donne son nom, et ont été décrites par Marchand (2002). Une partie a été dégagée lors de la construction de l'autoroute (point GPS).

Extraction et utilisation : carrière régionale, le matériau est employé à Kléonai ([site n°24](#)), Némée ([site n°25](#)), et peut-être à Phlious ([site n°26](#)). Il a peut-être été exporté : hypothèse pour Argos ([site n°29](#)) et l'Héraion d'Argos ([site n°30](#)).

Nature de la roche extraite : **travertin**. Tuf fluviatile : calcaire type *boundstone*, c'est une concrétion tubulaire continentale, de couleur beige à grise. Datée du Quaternaire ((Bornovas *et al.* 1972), elle présente une densité de 1,66 et porosité de 31,7%. En lame mince, on observe un ciment (micrite) avec une sparite dustique autour de bioclastes (bivalves recristallisés) et la porosité liée à la croissance (**Figure 67**). Cependant, l'affleurement présente de nombreuses variations de faciès (parfois plus dense, parfois non bioconstruit), le faciès ici décrit provient d'un échantillon de la carrière de l'autoroute.

Caractéristiques topographiques : Les carrières s'étendent sur une surface minimum 500 000 m², pour une production minimum estimée de 146 000 m³ (Marchand 2002). Elles se trouvent à une altitude de 220 mètres dans la plaine, mais la colline s'élève jusque 380 mètres. Elles se situent à 1,7 km de Kléonai au plus proche (dénivelé 20 mètres), et à environ 4 kilomètres de Némée (mais son extension à l'ouest n'est pas bien définie, peut-être plus proche). Finalement, elles se situent à 12 kilomètres de l'Héraion d'Argos et à 20 kilomètres d'Argos.

Échantillons : Kl.19.1, Kl.19.2, Kl.20.2, Kl.20.4 et échantillons associés.



Figure 67. Les carrières de Kléonai.

A et B : la zone nettoyée, visible depuis l'autoroute, avec des blocs abandonnés et de nombreuses traces d'extraction. C, D et E : vues macroscopiques du travertin, sur le terrain et surface coupée, présentant la macro-porosité naturelle de la roche et les laminations bioconstruites. F et G : vues microscopiques, où l'on peut voir la croissance de la roche et les recristallisations secondaires, et la porositi de croissance.

- **Q23 : Carrière d'Argos (37°34'36.87"N, 22°35'40.97"E)**

Nom et bibliographie : En Argolide, les carrières d'Argos n'étaient pas clairement identifiées avant une mission de terrain en 2021 (Piérart *et al.* 1987). Des traces d'exploitation moderne sont visibles sur place, mais les traces antiques qui avaient été décrites n'ont pas été retrouvées clairement : on observe surtout des déchets de taille. Un deuxième affleurement présente un faciès similaire : 38°28'20.1"N, 22°45'14.36"E (même formation géologique), mais il se situe au nord d'Argos près de Dervenakia (aussi indiquée dans (Piérart *et al.* 1987)).

Extraction et utilisation : La pierre ne semble pas avoir été exploitée pour des gros modules, mais plutôt des petits blocs ou des plaquages (voir 3.6). Elle aurait été employée à Argos ([site n°29](#)), l'Héraion d'Argos ([site n°30](#)), Épidaure ([site n°30](#)), et peut-être aussi à Némée ([site n°25](#)), Kléonai ([site n°24](#)), Corinthe ([site n°20](#)), Isthmia ([site n°23](#)), et Delphes ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Ce calcaire noir de type *wackstone*, présente un riche assemblage de foraminifères benthiques larges (millimétriques) (15%) dans une matrice micritique ; des spécimens des familles Disclocyclinidae et Nummulitidae sont représentés, qui datent la roche de l'Éocène. On peut noter une absence de porosité, de nombreuses fines veines de calcite, et quelques éléments bioclastiques (échinodermes) (**Figure 68**).

Caractéristiques topographiques : La carrière se situe à une altitude de 400 mètres et à environ 12 kilomètres d'Argos, 20 kilomètres de l'Héraion d'Argos, 30 kilomètres de Némée et Kléonai, 40 kilomètres d'Épidaure.

Échantillons : Ar-20-2, et Ar-20-3 pour la localité près de Dervenakia, avec échantillons associés.



Figure 68. La carrière d'Argos.

A et B : affleurement, avec nombreux déchets de taille, massif rocheux très discontinu (fracturation). C, D et E : échantillons macroscopiques, coupés et surfaces naturelles. F : vue microscopique avec les deux grandes familles des Nummulitidae (test lenticulaire hyalin) et Disclacyclinidae (tests allongés, structure complexe de loges)

- **Q24 : Carrières de Leventochori, près d'Olympie (37°41'21.0"N, 21°18'47.5"E)**

Nom et bibliographie : Les carrières n'ont jamais été documentées : elles ont été trouvées grâce à la mention dans une lecture mise à disposition par E. Chiotis (non publié et non officiel, mis en ligne en 2018).

Extraction et utilisation : non observée dans la construction. Le matériau a peut-être été employé à Élis ([site n°36](#)), et il ressemble aussi au faciès observé à Kalydon ([site n°34](#)). Ce faciès n'a pas été observé à Olympie mais cela devrait être vérifié de par la proximité de la carrière ([site n°37](#)).

Nature de la roche extraite : **grès**. *Grainstone* bioclastique, compact (densité 1,8), grossier mais bien trié, c'est un faciès détritique composé d'éléments figurés (60%) : fragments d'algues arrondis majoritairement, lithoclastes, foraminifères (milioles), bioclastes (fragments de coquilles de mollusques), quelques ooïdes. Dans une matrice sparitique faiblement cimentée, on observe une porosité inter-particulaire et des cavités (croûte riche en oxydes) : porosité totale de 20,3% (**Figure 69**).

Caractéristiques topographiques : Les carrières se trouvent à moitié sous l'eau, sur la côte (élévation 0 m), et s'étendent sur une surface approximative de 20 000 m² au minimum (limites non définies). Elles se trouvent à 23 kilomètres d'Élis, et 30 kilomètres d'Olympie (à vol d'oiseau).

Échantillons : Ol.21.1 et échantillon associé.

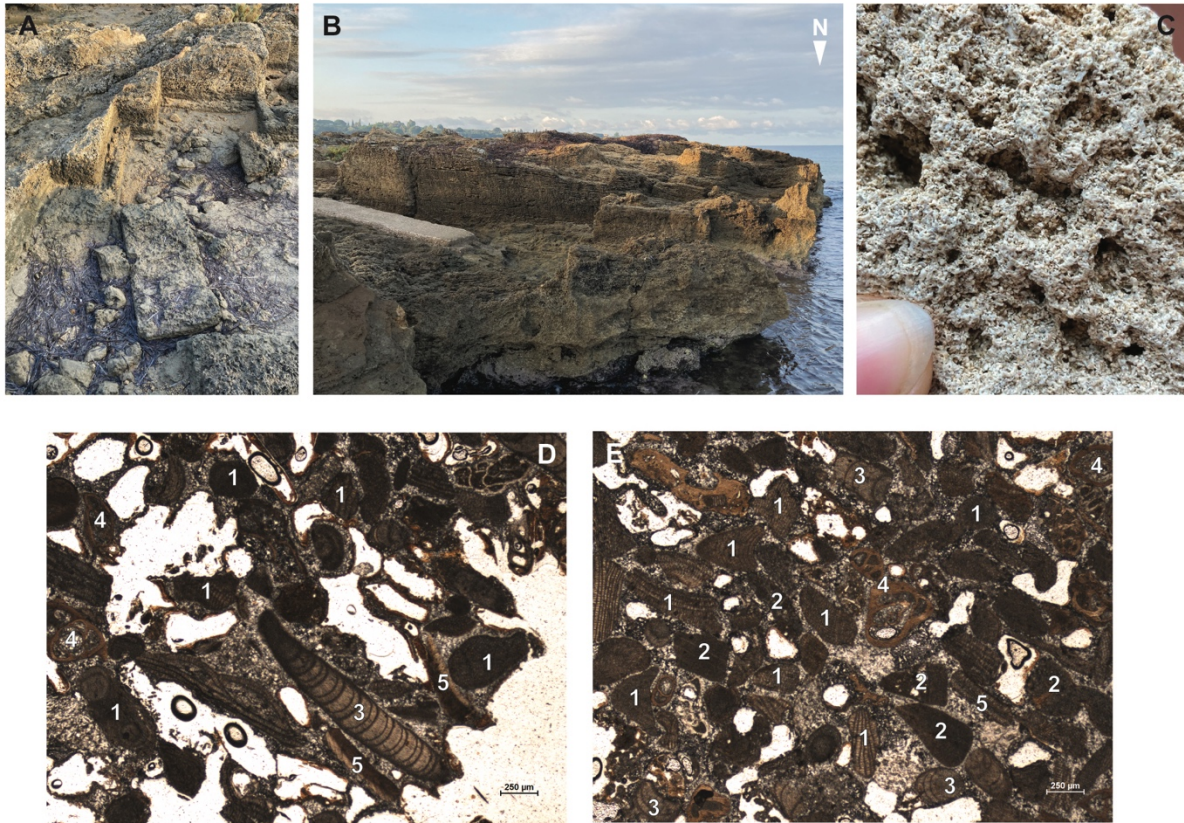


Figure 69. Les carrières de Leventochori, en Élide.

A et B : traces d'extraction visibles (tranchées, angles) avec blocs abandonnés, et front de taille au bord de l'eau. C : vue macroscopique de l'échantillon Ol.21.1, montrant la texture grossière mais le bon tri des grains. D et E : vues microscopiques de l'échantillon Ol.21.1, avec (1) fragments indéterminés d'algues rouges, (2) lithoclastes, (3) fragments d'algue rouge coralline, (4) foraminifères, (5) bioclastes.

- **Q25 : Carrière d'Eleusis (38° 2'32.33"N, 23°32'8.53"E)**

Nom et bibliographie : Les carrières d'Éleusis n'ont pas été clairement identifiées, même dans la littérature. Sur le terrain, on considère que la carrière moderne à l'arrière de l'acropole d'Éleusis a fourni la roche (Dermitzakis *et al.* 2006).

Extraction et utilisation : Employé à Athènes, peut-être à Delphes ([site n°1](#)).

Nature de la roche extraite : **calcaire dur**. Couleur bleu clair (observé) à bleu sombre (non observé, d'après la littérature), massif. Type *mudstone*, il se compose d'une matrice micritique avec 10% d'éléments figurés : foraminifères benthiques, échinodermes, morceaux de rudistes (**Figure 70**). Datée du Cénomaniens-Turonien (Dermitzakis *et al.* 2006).

Caractéristiques topographiques : surface non estimable. Elle se situe à 10 mètres d'altitude si la carrière se situe bien sur l'acropole sur site archéologique ; elle serait alors distante de 20 kilomètres d'Athènes.

Échantillons : El.20.1 et échantillons associés.

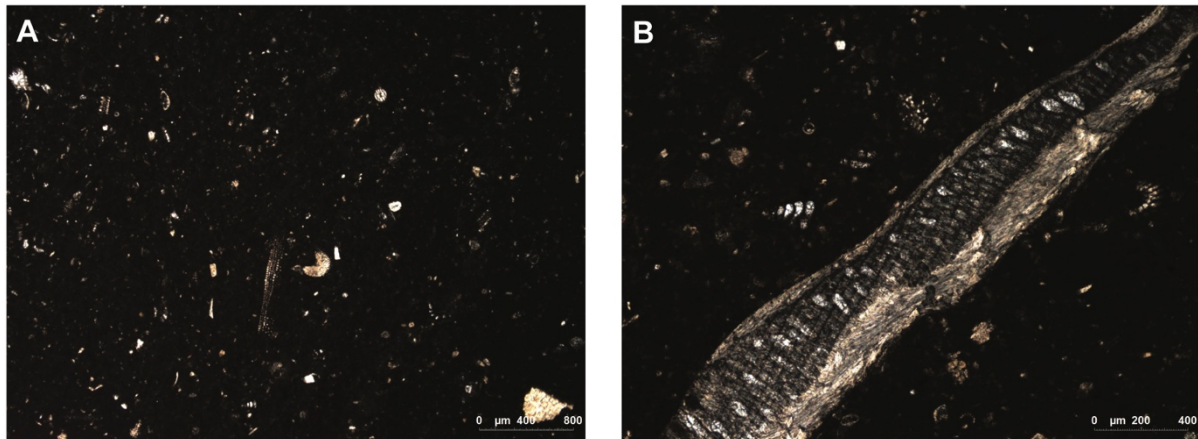


Figure 70. La carrière d'Éleusis : la roche extraite.

Vues macroscopiques : calcaire type *mudstone* avec bioclastes (rudistes, foraminifères, algues), dans une matrice micritique fine, sans porosité.

4.3 Approches pétrophysiques

4.3.1 Choix des échantillons et problématiques

Le but principal de cet axe de recherche était d'établir un protocole expérimental pour caractériser des roches mises en œuvre dans la construction grecque, dans le but de comprendre pourquoi elles ont été privilégiées, ou non, par les constructeurs grecs. Il a donc été décidé de sélectionner 6 faciès pour réaliser un ensemble de mesures expérimentales et, par extrapolation, pouvoir comprendre leur comportement et leur utilisation dans la construction (voir la méthodologie, [2.5](#) et [2.6](#)).

Il avait été observé à Delphes une importation de faciès légers très tôt dans l'histoire du site, alors que les plus lourds, comme les calcaires massifs, sont locaux (de Vals et al., 2020). Ces roches importées provenaient de la région de Corinthe, qui est connue pour avoir produit

des pierres de construction dans l'Antiquité et les carrières antiques ont été identifiées et étudiées (Hayward, 2013).

A Corinthe, les unités géologiques exploitées correspondent à des dunes de sables qui font partie de la séquence marine du Pleistocène supérieur et décrites par Collier & Thompson (1991). Ces dunes se retrouvent sous l'Ancienne Corinthe, à l'est d'Examilia ([Q16](#)), et au nord de Kenchrées ([Q20](#) et [Q21](#)). Les critères diagnostiques pour reconnaître la provenance des roches extraites ont été établis par Ch. Hayward pour la carrière d'Examilia (Hayward, 1996). Elle semble être la seule carrière dont la roche a été exportée : les dunes de l'Ancienne Corinthe semblent avoir servi uniquement pour la construction de Corinthe (de Vals et Moretti, 2022) ; les dunes de Kenchrées présentent un faciès de calcarénite impure qui ne semble pas avoir été employé autre part qu'à Isthmia (voir [site n°23](#)). Le but n'est donc pas de déterminer des critères d'identification puisque la provenance est presque assurée.

Le protocole mis en place s'intéressait au **comportement des roches une fois mises en œuvre**, c'est-à-dire sous les contraintes suivantes : pour les roches en fondation, sous la pression du poids du monument et sujettes aux remontées capillaires ; pour l'élévation, c'est plutôt le poids qui est un facteur important.

Pour le protocole expérimental, des échantillons sous forme de bloc étaient nécessaires (30 x 20 x 15 cm en moyenne). Les échantillons suivants ont été sélectionnés (**Figure 71**) :

- Les **calcaires durs** proviennent de la région de Delphes : le calcaire de Saint-Élie (DEL.A, DEL.E), le calcaire rose (DEL.B, DEL.D) et le calcaire du Parnasse (DEL.C).
- Les **faciès légers** de la région de Corinthe : la dune oolithique d'Examilia (EX.A, EX.B, EX.C, EX.D, EX.E), la calcarénite impure de Kenchrées (KE.A) et le travertin de Perachora (PE.A).

Ils ont été sélectionnés pour être caractérisés individuellement, mais aussi pour être comparés entre eux. La dune oolithique a été employée à Delphes (de Vals et al., 2020) et les deux autres faciès, exploités dans la région mais non exportés, servent de références : nous souhaitons comprendre pourquoi la dune oolithique a été privilégiée. Les différents calcaires durs sont des faciès locaux et régionaux employés dans la construction de Delphes.

Les analyses minéralogiques ont été réalisées au laboratoire de l'ISTeP à Sorbonne Université. Les mesures de pétro-mécaniques ont été réalisées au Laboratoire Géosciences et Environnement de l'Université de Cergy-Pontoise, grâce au concours de deux stagiaires,

Manon Morin en 2021 (L3) et Hichem Bouzaya en 2022 (M1), qui ont réalisé leur stage sur la caractérisation des calcaires, et de Christian David, Professeur encadrant. Les mesures de porosimétrie au mercure ont été réalisées par Yves Géraud au laboratoire Géo-ressources à Nancy.

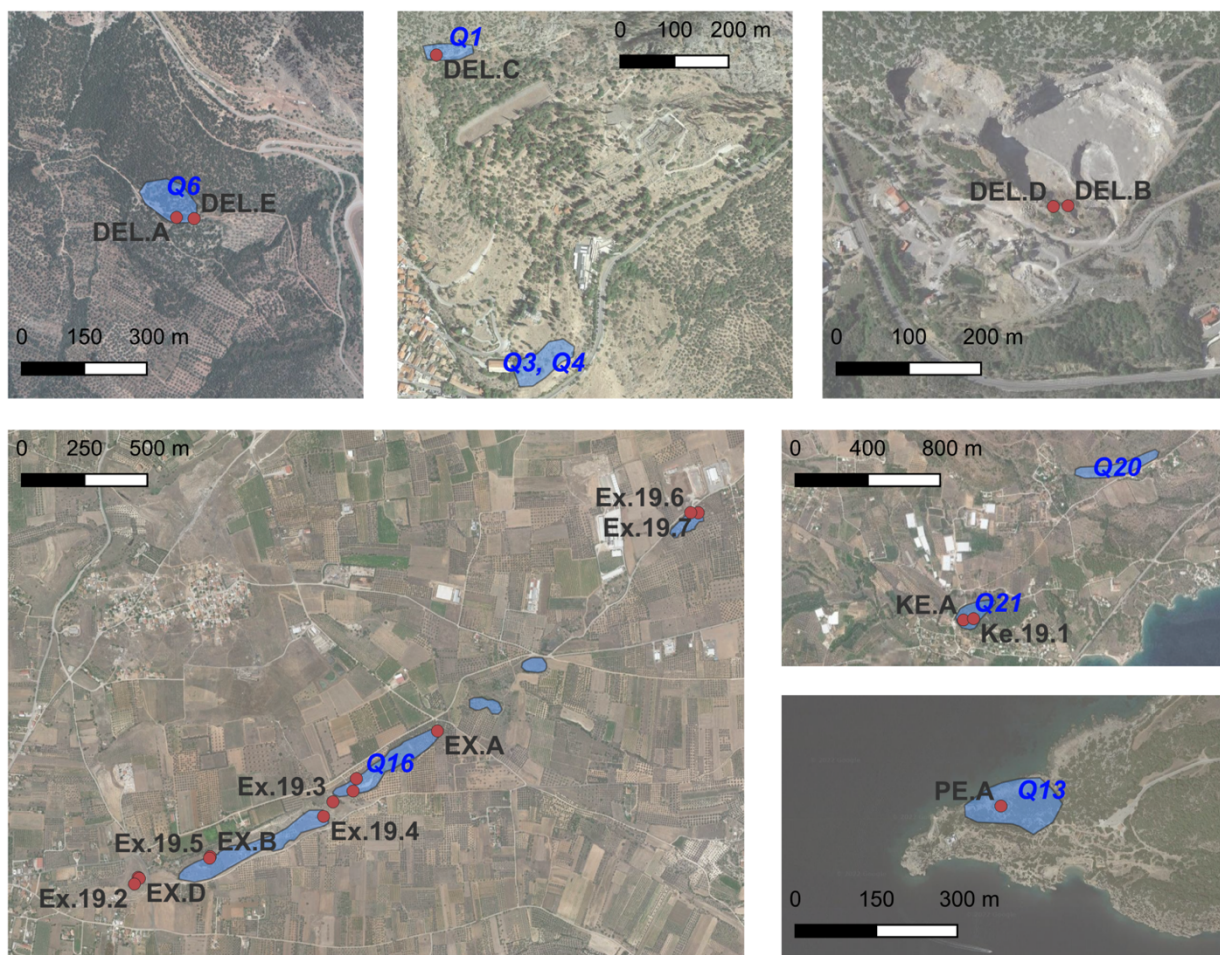


Figure 71. Cartes des carrières avec position des échantillons.

Calcaires durs de Delphes : DEL.A et DEL.E de la carrière Q6 ; DEL.C de Q1 ; DEL.D et DEL.B proviennent d’une carrière moderne. Faciès légers : EX.A, EX.B, EX.C, EX.D, EX.E pour Q16 ; KE.A pour Q21 ; PE.A pour Q13. La position des lames minces est aussi indiquée. Emplacement des carrières d’après Hayward, 1996 ; Hayward et Pitt, 2017 ; et nos observations.

4.3.2 Limitations du protocole expérimental

Très tôt dans les analyses, nous avons rencontré des problèmes liés surtout au choix des méthodologies appliquées et à la nature des roches sélectionnées. Ils doivent être explicités pour pouvoir exploiter nos résultats convenablement.

- **Découpe des échantillons**

Le protocole mis en œuvre pour les mesures mécaniques, décrit dans la partie [2.5](#), nécessitait une découpe précise des échantillons en cylindre. Pour cela, une carotteuse a été utilisée, sous un jet d'eau pour éviter un échauffement. Ensuite, une petite scie permettait de couper les carottes à la longueur voulue (5 cm ou 1,5 cm). Pour les échantillons réservés aux mesures de ténacité, un diamètre plus grand était nécessaire et la découpe en deux demi-cercles, et la fente, était faite avec une scie.

Nous avons rencontré trois problèmes majeurs la préparation des échantillons :

- **La casse à la découpe** : pour les calcaires durs, la découpe a été très difficile et beaucoup de cylindres se sont cassés pendant l'échantillonnage et dans la préparation des cylindres. Cela est arrivé aussi pour les faciès légers, mais moins fréquemment. Par exemple, du bloc DEL.E aucun échantillon n'a pu être obtenu pour les mesures de ténacité (grand demi-cylindre avec une fente) : uniquement quatre petits cylindres pour les essais brésiliens et deux grands pour les essais de compression ont été obtenus.
- **Une dégradation à cause de l'eau** : pour les faciès tendres, la découpe a été plus facile mais l'eau a endommagé certains échantillons (la découpe pouvait durer plus d'une heure en fonction de la taille du bloc et du nombre d'échantillons). Par exemple, le bloc KE.A n'a pu fournir que deux grands cylindres et un petit cylindre car les carottes fondaient le temps de les découper. De même pour EX.C : des macro-pores, non visibles sur le bloc, ont rendu la roche très friable. Uniquement des essais brésiliens ont pu être réalisés (6 échantillons).
- **Un problème de dimension** : les résultats de presse sont très dépendants de la taille et la forme des échantillons. Un échantillon dont les faces ne sont pas parfaitement parallèles ne se cassera pas correctement. Les découpages n'étaient pas toujours corrects (précision de la scie, erreur humaine).

- **Les limites des méthodes utilisés**

Non présentés dans l'introduction, des essais de mesures de perméabilité ont été réalisés au TinyPerm et au perméamètre à gaz, à l'Université de Cergy. La perméabilité est la capacité d'un matériau à laisser un fluide le traverser sous l'effet d'un gradient de pression. Elle est dépendante de la porosité de la roche (réseau poreux et sa géométrie), donc de la matrice et des

fracturations. Elle se calcule avec le débit du fluide, la viscosité de ce dernier, la surface du flux et la pression appliquée : elle s'exprime en Darcy (D) habituellement.

Les mesures réalisées n'ont pas donné de résultats satisfaisants : les valeurs étaient hors des limites de détections de la machine utilisée. Le TinyPerm possède une gamme de perméabilités mesurables entre 1 mD et 10 D. Pour le perméamètre à gaz, il peut descendre à des valeurs de 10^{-4} mD. C'est-à-dire, nos faciès étaient ou trop poreux, ou pas assez, pour obtenir une estimation numérique correcte et significative.

Enfin, d'autres protocoles n'étaient pas adaptés à des roches très dures et faiblement poreuses, comme les mesures d'imbibition capillaire. C'est-à-dire que le coefficient de capillarité est trop faible pour qu'il soit calculé correctement avec le montage expérimental utilisé ici (voir [2.4.4](#)). De même, la porosimétrie au mercure n'a pas fonctionné sur DEL.B, qui possède une porosité trop faible pour être mesurée correctement avec le mode appliqué.

Pour les mesures en presse, à la suite des difficultés d'obtenir des échantillons dans les dimensions exactes, certains résultats numériques ne sont pas corrects ou non représentatifs de la vraie résistance de la roche. Généralement, les échantillons se fracturent plus tôt que le vrai seuil permettant de calculer la résistance maximale (en compression et en traction). Ces échantillons ont été exclus de fait.

- **Non représentativité des données**

Les limites présentées ci-dessous ont eu comme conséquence une forte perte d'échantillon (l'exclusion de certains, mise à l'écart de données non conformes). Puisqu'une partie des analyses étaient destructives, il en découle que le nombre d'échantillons n'était pas suffisant pour atteindre une population représentative de chaque roche. Le jeu de données obtenu est donc à prendre avec précaution.

Cependant, les analyses réalisées nous ont permis de décrire convenablement les roches et d'obtenir les principales caractéristiques physiques de chacune : les données sont présentées ci-dessous. Pour une discussion sur le choix du protocole et comment l'améliorer, voir dans la partie discussion en [6.4](#).

4.3.3 Résultats de laboratoire

- **Pétrographie et minéralogie**

L'analyse pétrographique a été réalisée sur lame mince (**Figure 72**) et la composition minéralogique a été confirmée par analyses DRX (**Figure 73**). Les 6 faciès étudiés (**Figure 73**) sont décrits ci-dessous.

Dune oolithique (EX) (Figure 72, A ; Figure). Calcaire jaune, homogène. Tous les échantillons sont des *grainstones* (composés de grains plus petits que 2 mm, en contact, avec moins de 10% de boue), très faiblement cimentés par une sparite équigrulaire. Les éléments figurés sont presque exclusivement des ooïdes, majoritairement de type micritique, et plus rarement de type concentrique (1 ou 2 lamines visibles), qui peut signifier une micritisation ou recristallisation. L'absence presque totale d'un assemblage fossilifère (autre que dans les ooïdes) est caractéristique des environnements à forte énergie. La granulométrie est fine avec un très bon classement unimodal : ooïdes de 200 microns en moyenne, sphériques, entières et non fracturées. L'échantillon Ex.19.3 présente un classement un peu moins bon et des éléments plus allongés, mais toujours arrondis. De fait, ce faciès présente une forte porosité inter-grulaire, mais aussi moldique intra-grulaire (dissolution des nucléii). Le très bon classement des éléments est un facteur jouant sur la porosité, qui s'explique par l'absence d'une classe plus petite de grain pour occuper l'espace entre les grains plus gros. Les analyses montrent une composition minéralogique homogène sur l'ensemble des échantillons, composés à plus de 90% de calcite. La présence de minéraux détritiques (quartz, kaolinite) et accessoires (andalousite, mica, albite) s'explique par les nucléii des ooïdes, qui proviennent de l'érosion et la désagrégation des roches alentours (massifs pélagoniens avec ophiolites au sud).

Calcarénite impure (KE.A) (Figure 72, B ; Figure). Calcaire orangé à porosité moyenne, faciès détritique hétérogène, grossier (grains jusque 2 mm), moyennement trié, qui présente des traces de bioturbations et concrétions. En lame mince, c'est un *packstone* qui se compose de grains anguleux à ronds retravaillés et revêtus (50%) : lithoclastes (calcaire), minéraux variés (calcite, quartz, pyroxène), bioclastes (foraminifères, coquilles, équinodermes) et ooïdes dans une matrice micritique. Remplissage des cavités par une microsparite mais

porosité résiduelle. Les analyses montrent une composition minéralogique majoritairement calcitique mais avec une proportion importante de minéraux détritiques.

Stromatolithes (PE.A) (Figure 72, C ; Figure). Datés de la fin du Pléistocène, l'échantillon provient des biohermes de *Rivularia* présent sur la côte nord de la Péninsule de Perachora, pouvant atteindre 10 mètres de haut (Portman *et al.* 2005). En forme de dôme, ils présentent des faciès variés à faible échelle. L'échantillon provient de la structure interne du dôme : calcaire bioconstruit, biogénique. Composé de colonies de cyanobactéries calcifiées, il présente des structures classiques tubulaires (qui peuvent être branchues ou laminées dans les parties extérieures). Très poreux, avec des cavités construites et une micro-porosité entre les laminations. Hétérogène avec des strates détritiques, bioconstruites et encroûtements. En lame mince, on observe les colonies biologiques qui forment la roche, dans une matrice micritique fine. Leur composition est calcitique majoritairement.

Calcaire de Saint-Élie (DEL.A) (Figure 72, D ; Figure). Calcaire gris clair, massif, qui présente des veines de calcite blanche, rectilignes et millimétriques, recoupant avec un angle de 90° en moyenne le réseau de joints stylolithiques, parallèles, mais irréguliers, simples et de faible amplitude (1,3 u./cm). Quelques nodules de silex centimétriques ont été observés à l'affleurement, mais ne sont pas présents dans nos échantillons. Les analyses montrent une composition calcitique de la roche. En lame mince, c'est un *mudstone* qui présente un assemblage fossilifère riche et diversifié (15 à 20% des grains) dans une matrice micritique. Les calcisphères et foraminifères pélagiques sont majoritaires : l'espèce *Globotruncana arca* (Cushman, 1926) avec un test biconvexe trochospiralé bas, hyalin et perforé, entre 6 et 9 loges bien délimitées, à deux carènes, est attribué au Maastrichtien. Quelques fragments de coquilles de bivalves, des foraminifères de forme conique et d'autres planispiralé (section transverse) sont visibles, de petite taille (< 0,4 mm). Les tests sont entiers et bien conservés, l'environnement de dépôt est pélagique et benthique. La porosité est très faible et localisée dans les joints stylolithiques, qui sont parfois ouverts.

Calcaire rose (DEL.B, DEL.D) (Figure 72, F ; Figure). Calcaire rose, massif, avec un réseau de stylolithes dense (2 u./cm) : stylolithes fermés, parallèles, de type 3 ou 4 (*sutured* ou *wavy*) et de faible amplitude, mélangés avec des stylolithes ouverts de plus large amplitude. Parfois, le réseau devient anastomosé : les stylolithes se recoupent tellement qu'il est difficile

de les suivre. Les veines de calcites millimétriques à centimétriques (jusqu'à 2 centimètres) recoupent ou sont recoupées par les stylolithes avec un angle de 90° majoritairement. En lame mince, c'est un calcaire *wackestone* composé à 40% de grains (foraminifères planctoniques, foraminifères multi-chambres, dont identifiés *Rugoglobigerina rugosa* (Plummer, 1927), *Globotruncanella pschadae* (Keller, 1946), *Abathomphalus mayaroensis* (Bolli, 1951)) dans une matrice micritique. L'assemblage fossilifère permet de dater la roche du Crétacé terminal : il pourrait donc correspondre à un équivalent latéral du calcaire de Saint-Élie. Sa position structurale, même s'il n'y a pas de continuité entre les affleurements, est en faveur de cette hypothèse.

Calcaire du Parnasse (DEL.C) (Figure 72, E ; Figure). Calcaire massif, gris, qui présente une macro-porosité liée aux karsts et aux fractures, qui sont en partie ou totalement remplies de calcite. En lame mince, c'est un *wackestone* composée à 50% de grains, dans une matrice sparitique. Les éléments figurés identifi  ables sont : pellets, oo  ides, algues, échinodermes et d'autres restes biologiques non identifiés. Les analyses montrent une composition calcitique avec du quartz détritique.

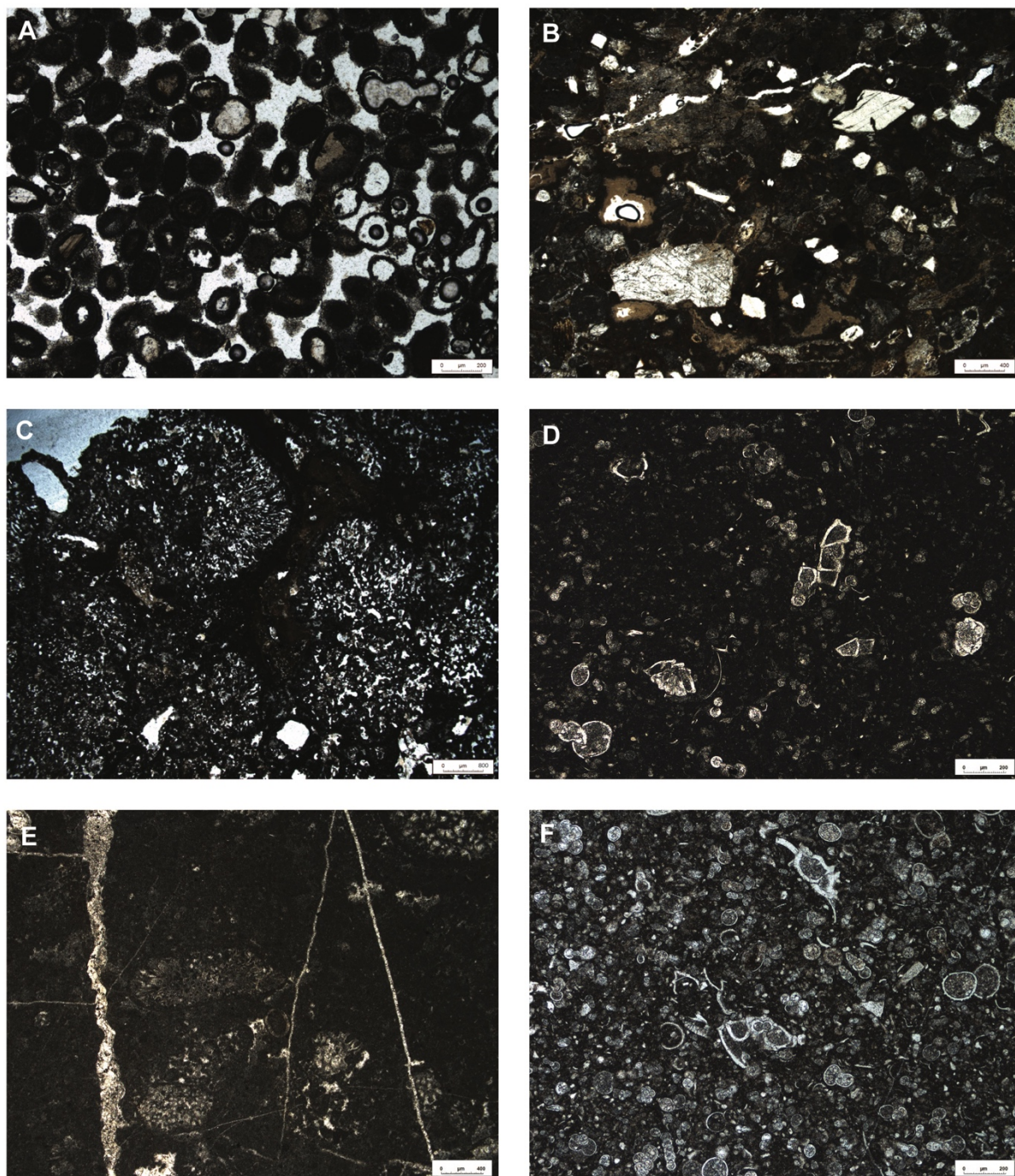


Figure 72. Vues microscopiques des échantillons étudiés.

A : la dune oolithique (EX). B : la calcarénite impure de Kenchrées (KE.A). C : le stromatolite de Perachora (PE.A). D : le calcaire de Saint-Élie (DEL.A). E : le calcaire du Parnasse (DEL.C). F : le calcaire rose (DEL.B). Les échelles ne sont pas toutes les mêmes.



Figure 73. Cylindres des échantillons étudiés.

Les faciès légers en haut (EX, KE, PE) et ceux durs en bas (DEL). Les cylindres font 5 cm de hauteur, pour un diamètre de 2,5 cm.

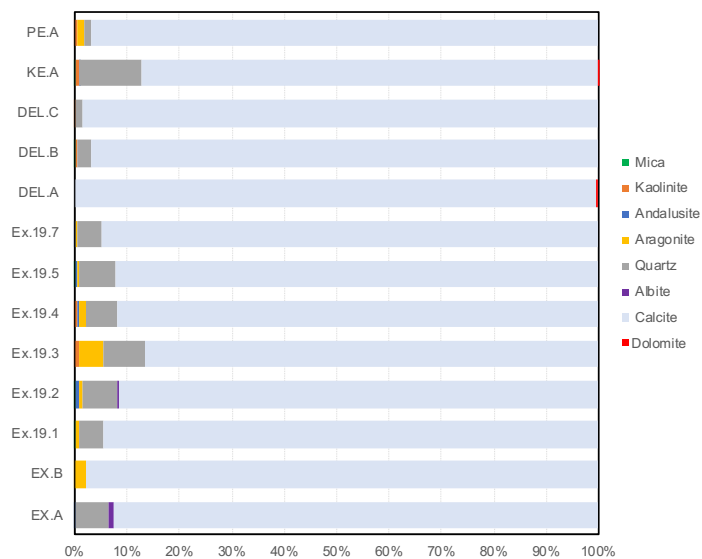


Figure 73. Composition minéralogique des échantillons étudiés.
La dune oolithique de Corinthe (EX), des calcaires durs de Delphes (DEL), du stromatolithe de Perachora (PE) et de la calcarénite impure de Kenchrées (KE).

- **Densité et porosité**

Les densités de phase solide et les densités apparentes sont représentées en fonction de la porosité, pour les faciès légers (EX, KE, PE) et les faciès durs (DEL.A, DEL.B, DEL.C) dans la **Figure 74**. Pour les blocs EX, au total 11 échantillons ont été analysés ; pour le bloc KE.A, 2 échantillons ; pour PE.A, 9 échantillons ; pour DEL.A, 12 échantillons ; pour DEL.B, 6 échantillons ; pour DEL.C, 8 échantillons. Une synthèse des mesures par bloc est présentée dans le **Tableau 3**.

Pour les faciès légers, la porosité est comprise entre 31 et 46 %, la densité apparente entre 1,4 et 1,8 g/cm³, et la densité de phase solide entre 2,3 à 2,7 g/cm³. Pour les faciès durs, la porosité est comprise entre 0,2 et 5,0 %, la densité apparente varie entre 2,6 et 2,7 g/cm³, et la densité de phase solide entre 2,6 à 2,7 g/cm³. La densité de phase solide est, par définition, non corrélée à la porosité, car elle ne prend en compte que les minéraux constituant la roche : elle ne dépend que de la composition minéralogique. A l'inverse, la densité apparente se corrèle avec la porosité avec une corrélation inverse classique. C'est ce que l'on observe pour tous nos échantillons, faciès légers et durs (**Figure 74**).

Les analyses pétrologiques et minéralogiques ont permis de déterminer la composition minéralogique des différents faciès. Les densités associées à chaque minéral sont présentées dans le **Tableau 4**.

On observe très peu de variations entre les différents faciès de **calcaires durs** : la densité de phase solide est en moyenne de 2,7 g/cm³, pour une densité apparente comprise entre 2,6 et 2,7 g/cm³. Cela est cohérent avec la composition mono-minéralogique de la roche (calcite) et la quasi-absence de porosité connectée dans les échantillons DEL.A et DEL.B, à l'exception des joints stylolithiques.

Cependant, DEL.C présente une densité apparente légèrement plus basse que les autres (2,6 en moyenne) car elle possède aussi une porosité plus importante : $3 \pm 1,1$ %, contre inférieure à 1% pour DEL.A et DEL.B. Le faciès de DEL.C possède de nombreux karsts (**Figure**) : la porosité devrait être significativement plus élevée. Cela s'explique par la méthode utilisée (la porosimétrie à l'eau) qui ne prend pas en compte les pores trop grands : lors des mesures de masse saturée, l'eau s'échappe. La masse saturée est donc plus faible, ce qui fausse le calcul de porosité et diminue la valeur.

Pour les faciès légers, la **dune oolithique** (EX) présente une densité apparente moyenne de $1,5 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$, une densité de phase solide moyenne de $2,6 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ et une porosité moyenne de $40 \pm 3,3 \%$. Les variations restent assez faibles, ce qui montre la grande homogénéité de la dune.

La densité de phase solide est significativement plus faible que la densité de la calcite, du quartz et de l'aragonite (**Tableau 4**), qui sont les composants majeurs de la dune (**Figure 73**). Cela peut s'expliquer par : (1) la présence d'une phase argileuse plus importante et localisée ; (2) une porosité non connectée, alors non prise en compte par la porosimétrie à l'eau ; (3) un biais dans la mesure. Les analyses de DRX n'ont pas mis en avant la présence de minéraux argileux en grande quantité. L'analyse des lames minces montre une porosité intergranulaire et intra-granulaire (dissolution des nucléus) importante. Cependant, les mesures de phase solide au pycnomètre à gaz nous donne des valeurs de 2,70 et 2,69 pour EX.A et EX.B (**Tableau 3**), ce qui est beaucoup plus cohérent avec la composition de la dune : il doit y avoir un biais dans la mesure.

Le **stromatolithe** de Perachora (PE) et la **calcarénite impure** de Kenchrées (KE) présentent des propriétés similaires à première vue à celles de la dune oolithique de Corinthe. Cependant, les échantillons de KE présentent quand même la porosité la plus faible, et donc la densité apparente la plus élevée, parmi les faciès légers, ce qui correspond bien au faciès observé en lame mince (micrite, porosité non connectée, type cavités) (**Figure 72, B**). Par contre, sa densité de phase solide est parmi les plus basses, à $2,5 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$, alors que sa composition minéralogique est similaire à EX, avec une proportion de quartz et de kaolinite plus grande mais qui semble insuffisante pour expliquer cette différence (**Figure 73**). Comme pour la dune, le résultat obtenu au pycnomètre à gaz est de 2,7 (**Tableau 3**) : il faut prendre en compte la marge d'erreur liée à la méthode, comme avec la dune oolithique, et le fait qu'uniquement 2 échantillons ont pu être analysés pour KE.A.

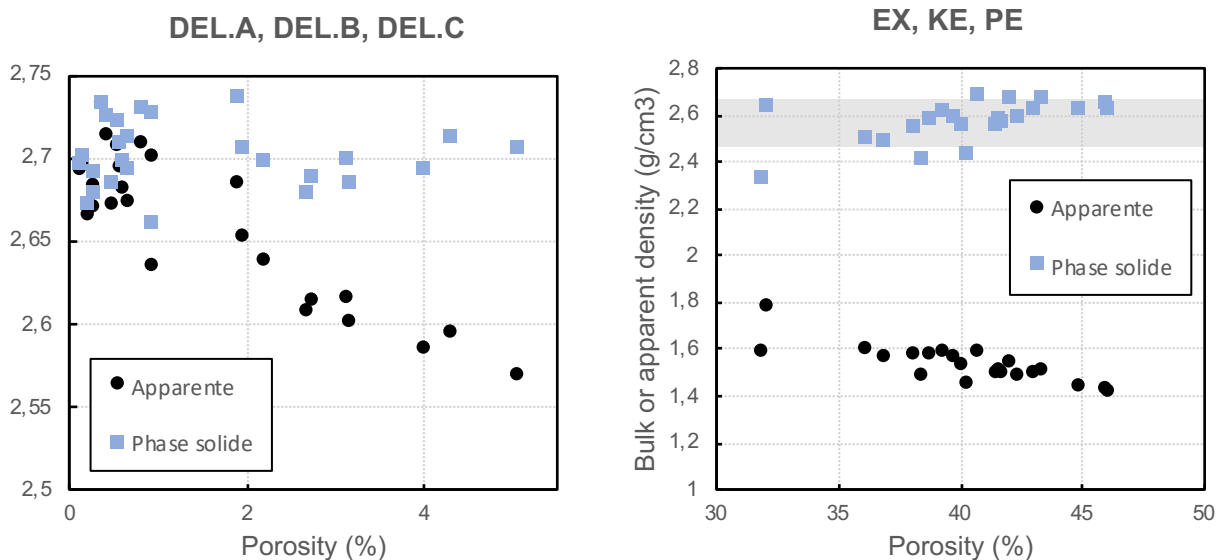


Figure 74. Densité apparente et densité de phase solide en fonction de la porosité.

Pour l'ensemble des échantillons, les faciès durs à gauche (DEL.A, DEL.B, DEL.C), et les faciès légers à droite (EX, KE, PE). Les échelles horizontales et verticales ne sont pas les mêmes : la zone grisée dans le second graphique, correspond à l'étalement des données pour les calcaires durs (pour la densité).

N°	Densité apparente (g/cm ³)	σ	Densité de phase solide (g/cm ³)	σ	Porosité (%)	σ
EX.A	1,50	0,12	2,66	0,04	43,5	3,8
EX.B	1,50	0,07	2,59	0,06	42,0	3,9
EX.C	1,46	0,02	2,42	0,02	39,4	1,3
EX.D	1,58	0,02	2,52	0,03	37,2	1,4
KE.A	1,69	0,14	2,48	0,21	32,1	0,2
PE.A	1,52	0,03	2,60	0,04	41,3	1,3
DEL.A	2,68	0,03	2,70	0,02	0,8	0,9
DEL.B	2,69	0,01	2,71	0,02	0,6	0,2
DEL.C	2,61	0,03	2,70	1,09	3,3	1,1

N°	Densité de phase solide (g/cm ³)
DEL.A	2,71
DEL.B	2,72
DEL.C	2,72
EX.A	2,70
EX.B	2,69
PE.A	2,67
KE.A	2,70

Tableau 3. Synthèses des densités apparentes, de phase solide et porosité.

Mesurées par porosimétrie à l'eau (à gauche), et densité de phase solide mesurée au pycnomètre à gaz (à droite). EX : dune oolithique de Corinthe. KE : calcarénite impure de Kenchrées.

DEL.A : calcaire de Saint-Élie. DEL.B : calcaire rose. DEL.C : calcaire du Parnasse.

Minéral	Densité (g/cm ³)
Calcite	2,71
Dolomite	2,84
Aragonite	2,93
Quartz	2,62
Feldspath (dont albite)	2,6 en moyenne
Andalousite	3,15
Micas	>2,8
Argiles (Kaolinite et illite)	2,6 (montmorillite : 2)

Tableau 4. Densités des principaux minéraux présents dans les échantillons étudiés, d'après la littérature.

- **Propriétés du réseau poreux**

Les propriétés du réseau poreux sont analysées par porosimétrie au mercure. La méthode permet d'accéder aux densités et à la porosité totale au mercure, la taille médiane des seuils de pores et leur géométrie, ainsi que leur répartition. Les classes des pores ont été définies par Nieminen & Uusinoka (1988) et Bourgès *et al.* (2008) et le pourcentage représente la porosité des pores de la classe, sur la porosité totale. Les résultats sont synthétisés dans le **Tableau 5**.

Les analyses sont réalisées sur 5 échantillons de EX, pour vérifier l'homogénéité de la formation ; 4 échantillons de calcaires durs ; 2 échantillons KE.A et PE.A. En plus, quatre faciès légers provenant de carrières antiques connues ont été analysés : du travertin de Kléonai (Kl.19.1, voir [Q22](#)), le calcaire coquillier de Mégare (Mg.20.3, voir [Q12](#)), le *grainstone* bioclastique d'Olympie (Ol.21.1, voir [Q24](#)) et un échantillon d'Égine (non documenté ici, échantillon Eg.20.1 : *grainstone* détritique composé à 60% d'ooïdes, pelets, cristaux, fragments de coquilles, lithoclastes, beaucoup sont retravaillés ; grains anguleux à arrondis, classement moyen et très faiblement cimenté par une sparite (5%), porosité 35%). Le but était de pouvoir comparer les caractéristiques de roches exportées (EX, Mégare, Égine) à celles non exportées (KE.A, PE.A ; hypothèse pour Kléonai et Olympie).

La distribution des rayons des seuils d'accès est présentée pour la **dune oolithique** (EX), en **Figure 75**. On observe :

- Un réseau majoritairement unimodal pour tous les échantillons de EX. Il existe une famille de pores dominante, bien interconnectée et uniformément répartie dans

l'échantillon : sur la courbe de porosité incrémentale (en bleue), on observe un pic principal, net et peu étalé en abscisse, autour de 50 μm . Cette catégorie est responsable d'environ 70% de la porosité totale de la roche (**Tableau 5**).

- Cependant, un second compartiment accessoire de porosité s'observe. Ce second pic est de très faible amplitude, étalé et ses limites ne sont pas claires, avec un maximum autour de 0,2 μm . Ses pores sont responsables du reste de la porosité de la roche (15 à 20%) (**Tableau 5**). Quand ce second pic est plus important, on peut considérer que la dune possède un réseau bi-modal, même si la première catégorie de pore est dominante.
- Sur les courbes de porosité incrémentale, la courbe d'extraction et d'injection (noir, pointillé) ne suit pas la courbe originelle : du mercure reste bloqué dans les pores. Cela signifie que les seuils de pores sont étroits par rapport au volume du pore.

N°	Densité apparente (g/cm ³)	Densité de phase solide (g/cm ³)	Porosité (%)	Diamètre médian (μm)	Taille <0,1 μm (%)	Taille 0,1 - 5 μm (%)	Taille > 5 μm (%)
EX.A5	1,36	1,97	31,1	42,7	4	32	64
EX.A6	1,59	2,52	37,0	53,6	3	26	70
EX.B9	1,56	2,69	42,0	42,4	4	20	76
EX.C	1,43	2,60	44,8	54,9	4	16	80
EX.D7	1,67	2,64	36,6	37,9	5	17	79
EX.E5	1,72	2,65	35,3	40,0	5	18	77
DEL.E	2,65	2,66	0,4	103,8	x	x	x
E15	2,75	2,77	0,6	11,7	x	x	x
DEL.B	2,69	2,71	0,5	x	x	x	x
DEL.C17	2,64	2,69	1,6	10,4	x	x	x
KE.A	1,79	2,54	29,7	49,8	2	15	83
PE.A	1,62	2,63	38,4	24,2	8	24	68
KL.19.1	1,66	2,43	31,7	4,5	4	48	49
Mg.20.3	1,75	2,57	32,1	24,2	0	14	86
OI.21.1	1,80	2,26	20,3	34,1	11	22	67
Eg.20.1	1,65	2,56	35,3	9,0	17	32	52

Tableau 5. Synthèse des mesures de porosimétrie au mercure.

Pour la dune oolithique (EX), le calcaire de Saint-Élie (DEL.E, E15), le calcaire rose (DEL.B), le calcaire du Parnasse (DEL.C17), la calcarénite impure (KE.A), le stromatolithe (PE) et d'autres faciès à titre de comparaison. Les classes de pores indiquent le pourcentage que les pores représentent sur la porosité totale.

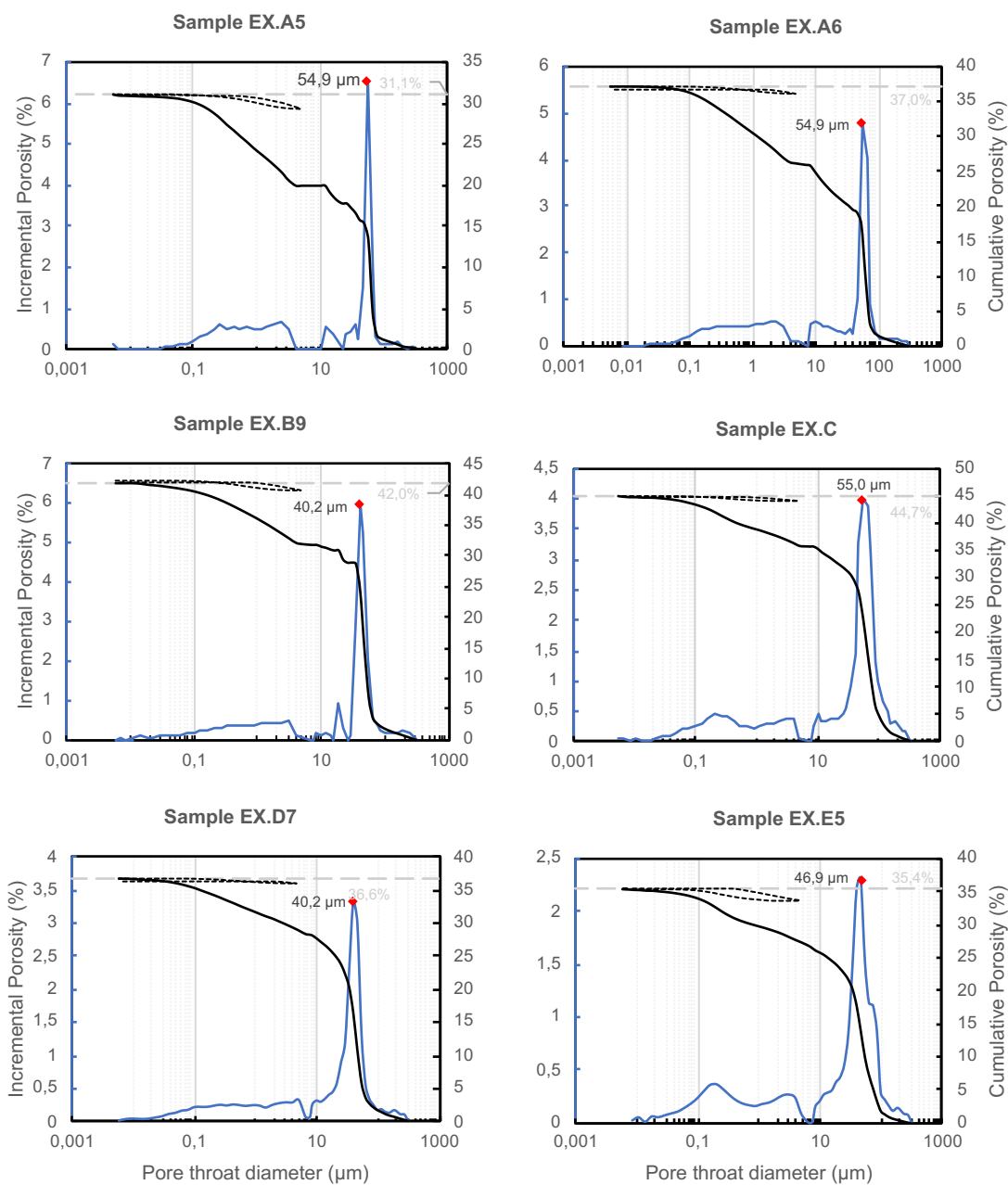


Figure 75. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les échantillons EX.

Les titres des axes sont les mêmes pour tous les graphiques. Courbes de porosité incrémentale (en bleue), cumulée (en noir), phase d'extraction et d'injection (en pointillé), avec la porosité totale au mercure (ligne grise, pointillée). Les courbes ne sont pas lissées : le replat autour de 10 μm est dû au changement de mode d'analyse.

La distribution des rayons de seuils d'accès en fonction de la porosité cumulée et incrémentale, pour la **calcarénite** (KE.A) et le **stromatolithe** (PE.A), est présentée en **Figure 76**. On observe :

- Un réseau unimodal pour KE.A, avec une famille de pores dominante, bien interconnectée et uniformément répartie dans l'échantillon, responsable d'environ 80% de la porosité totale, qui s'étalent autour de $64 \mu\text{m}$.
- Un réseau hétérogène pour PE.A : deux classes de pores autour de 75 et $40 \mu\text{m}$, responsable de 70% de la porosité totale, et des pores plus petits, responsable du reste de la porosité totale au mercure (**Tableau 5**). Cependant, les macro-pores ne sont pas pris en compte ($> 350 \mu\text{m}$).
- La courbe d'extraction et d'injection ne suit pas la courbe originale : la géométrie des pores est telle que le fluide reste bloqué (petit seuil par rapport aux pores). Cette tendance est moins marquée pour l'échantillon PE.A : ce dernier possède plusieurs classes de pores (réseau hétérogène), certains pores doivent présenter une géométrie qui ne bloque pas le fluide lors de la phase d'extraction.

La distribution des rayons de seuils d'accès en fonction de la porosité cumulée et incrémentale, pour les **calcaires durs** (E15=DEL.A, DEL.E ; DEL.C), est représentée en **Figure 77**. Les résultats pour DEL.B ne sont pas affichés : l'échantillon était trop peu poreux et l'analyse n'a pas fonctionné. De même, les courbes d'extraction et d'injection ne sont pas affichées car la porosité était trop faible : les limites de l'instrument sont atteintes. On observe :

- Un réseau hétérogène pour tous les échantillons, sans classe de porosité clairement définie. Ils présentent tous des pics supérieurs à $100 \mu\text{m}$ ($=0,1 \text{ mm}$), contrairement aux autres faciès. Cela peut s'expliquer par les discontinuités macroscopiques que l'on observe sur les échantillons : fracturations et/ou les joints stylolithiques, qui représentent la forme de porosité la plus importante de ces faciès.
- DEL.C présente une porosité au mercure de 1,6 %, ce qui est significativement plus bas que les mesures de porosité à l'eau ($3 \pm 1,1 \%$). Cela est dû aux limites de la machine utilisée (uniquement les pores compris entre 350 ($=0,35 \text{ mm}$) et $0,005 \mu\text{m}$ sont mesurés) et à l'hétérogénéité du faciès : il présente un réseau développé de fractures et micro-karsts millimétriques (**Figure**).

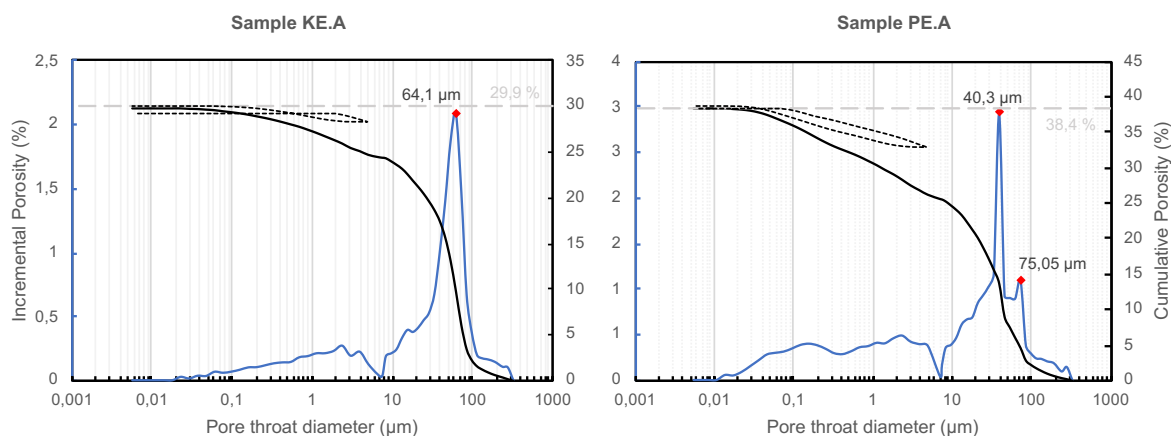


Figure 76. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les échantillons KE.A et PE.A.

Courbes de porosité incrémentale (en bleue), cumulée (en noir), phase d'injection et d'extraction (en pointillé), avec la porosité totale au mercure (ligne grise, pointillée). Les courbes ne sont pas lissées : le replat autour de 10 μm est dû au changement de mode d'analyse.

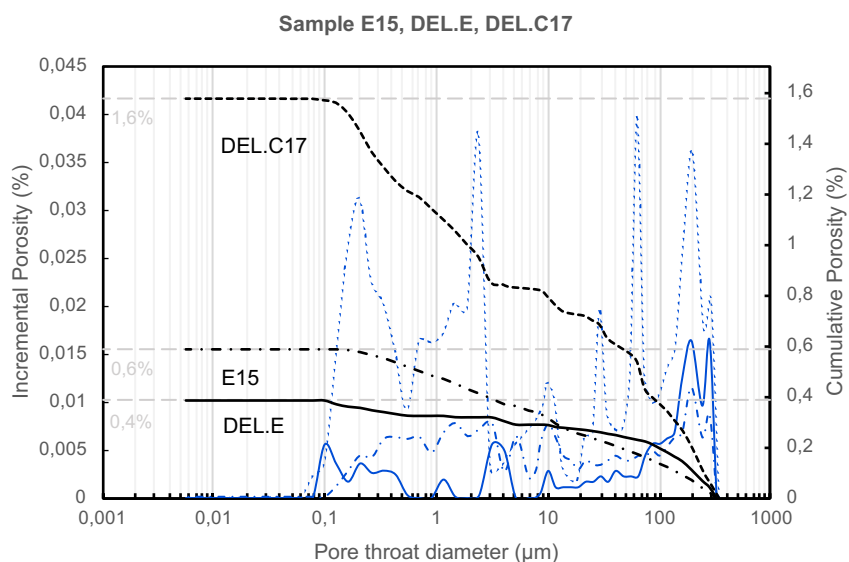


Figure 77. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les calcaires durs.

Courbes de porosité incrémentale (en bleue), cumulée (en noir), pour trois échantillons : E15 (=DEL.A), DEL.E et DEL.C. Les courbes ne sont pas lissées : le replat autour de 10 μm est dû au changement de mode d'analyse.

Enfin, la distribution des rayons de seuils d'accès en fonction de la porosité cumulée et incrémentale, pour les **autres faciès légers** (Kléonai (Kl.19.1, voir [Q22](#)), Mégare (Mg.20.3, voir [Q12](#)), Olympie (Ol.21.1, voir [Q24](#)) et Égine (Eg.20.1)), est présentée en **Figure 78**. On observe :

- Un réseau bimodal pour le *grainstone* d'Égine (Eg.20.1) : avec deux classes de pores bien définies, à 34,5 μm et 0,2 μm , responsables chacun de 50% de la porosité totale de la roche (35%) (**Tableau 5**). Cela peut s'expliquer par le classement de la roche : l'arrangement des éléments figurés de petite taille, arrondis (ooïdes, pellets) et de grande taille, anguleux (lithoclastes, bioclastes). L'espace entre les petits grains peut être à l'origine de la seconde classe de pores, de même pour les gros éléments. Le mercure ne reste pas ou peu bloqué dans les pores (courbe en pointillée) : le réseau est plutôt continu sans rétrécissements des seuils par rapport aux pores. La très faible cimentation de la roche peut en être la cause.
- Un réseau hétérogène pour le travertin de Kléonai (Kl. 19.1) : il n'y a pas de classe bien définie (courbe de porosité cumulée presque linéaire). On observe une grande diversité de pores de taille supérieure à 10 μm (jusque 100 μm , soit 0,1 mm), jusque 0,2 μm (**Tableau 5**). Cependant, la porosité totale mesurée de 31,7% ne prend pas en compte les gros pores, l'instrument utilisé ne mesurant pas les pores supérieurs à 350 μm (0,35 mm).
- Un réseau hétérogène pour le *grainstone* bioclastique d'Olympie (Ol.21.1) : les classes sont mieux définies (pics plus étroits) mais diversifiées. Les seuils de pores supérieurs à 50 μm sont responsables de 50% de la porosité totale, et les pores les plus petits peuvent atteindre jusque 0,01 μm (**Tableau 5**). Il présente une porosité connectée plus faible que les autres (20,3%), qui serait cohérente avec le type de porosité (dissolution, mais faciès bien cimenté).
- Un réseau unimodal pour le calcaire coquillier de Mégare (Mg.20.3) : cependant, comme pour les travertins, les gros pores ne sont pas pris en compte. La mesure est ici valable uniquement pour la matrice, qui est faiblement cimentée par une sparite et composée de pellets (taille <200 μm). Le réseau doit être en réalité hétérogène.

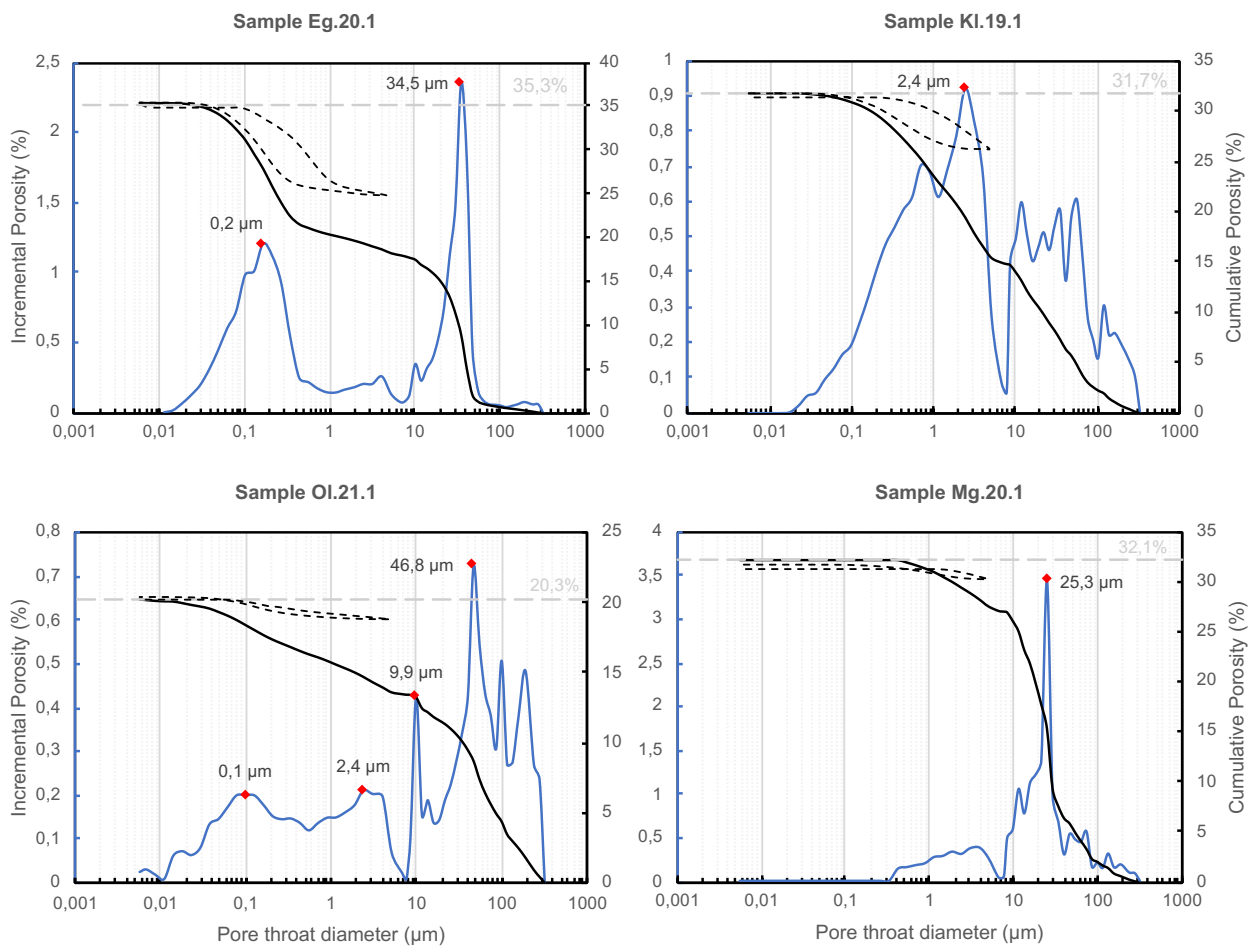


Figure 78. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les autres faciès légers.

Courbes de porosité incrémentale (en bleue), cumulée (en noir), pour quatre échantillons : *grainstone* détritique d'Égine (Eg.20.1), travertin de Kléonai (Kl.19.1), *grainstone* bioclastique d'Olympie (Ol.21.1), calcaire coquillier de Mégare (Mg.20.1). Les courbes ne sont pas lissées : le replat autour de 10 μm est dû au changement de mode d'analyse.

Les mesures de perméabilité et de capillarité n'ont pas été concluantes, comme indiqué dans les limitations (4.3.2). Sans les courbes de capillarité correctes, nous n'avons pas pu obtenir des informations sur les réseaux poreux pour confirmer nos analyses faites par porosimétrie au mercure. La perméabilité et les cinétiques d'imbibition capillaire devaient nous fournir des informations sur le comportement des roches face à l'eau.

Des résultats partiels sont présentés dans le **Tableau 6** : s'ils ne sont pas représentatifs de la valeur exacte des propriétés, ils nous montrent des comportements cohérents avec le faciès sédimentaire. Les calcaires durs ont une perméabilité très faible, DEL.C légèrement plus importante : c'est aussi le faciès qui présente une porosité supérieure (3,3 %). La perméabilité des roches massives se concentrent dans les fissures, et non dans la matrice rocheuse.

Pour les faciès poreux, la perméabilité augmente avec le diamètre moyen des pores, mais diminue si le faciès est hétérogène et plus la porosité totale est faible (Rousset-Tournier 2001) : PE.A présente en effet une porosité et un diamètre de pore médian plus faible que la dune oolithique (**Tableau 5**).

Les mesures du coefficient de capillarité ne sont pas non plus ici cohérentes : on observe un facteur 10 de différence au sein de la dune oolithique (EX), et une valeur incohérente pour PE.A. Cela pourrait être imputée aux pores trop gros pour que les remontées capillaires aient lieu : le coefficient de capillarité serait alors plutôt représentatif de la matrice calcaire et la porosité associée.

N°	Perméabilité (mD)	C (g.cm ⁻² .s ^{-1/2})
DEL.A	0,02	0,09
DEL.B	0,02	0,1
DEL.C	101	0,09
EX.A	6850	0,13
EX.B	-	0,14
EX.D	-	1,17
PE.A	2306	0,07

Tableau 6. Perméabilité (mD) et coefficient de capillarité (g.cm⁻².s^{-1/2}) pour les échantillons étudiés. Les mesures de perméabilité sont obtenues au TinyPerm, et les coefficients de capillarité par imbibition capillaire.

- **Mesures acoustiques**

Les mesures acoustiques ont été réalisées sur 58 échantillons : 17 échantillons de dune oolithique (4 échantillons du bloc A, 6 échantillons du bloc B, 2 échantillons du bloc C et 5

échantillons du bloc D), 11 échantillons de DEL.A, 8 échantillons de DEL.B, 9 échantillons de DEL.C, 2 échantillons de KE.A, et 11 échantillons de PE.A. Les mesures ont été réalisées aussi sur une partie des échantillons en saturé pour observer les effets de la saturation en eau sur les vitesses. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (**Tableau 7**).

Les densités apparentes sont représentées en fonction de la vitesse des ondes P en **Figure 80**. Les vitesses des ondes P diminuent avec la présence de discontinuités, remplies d'air ou d'eau : les pores ou les fractures. Les modules élastiques diminuent alors en présence de ces discontinuités. On observe :

- Pour la **dune oolithique** (EX), une assez grande dispersion des valeurs de V_p mais toujours avec pseudo-corrélation avec la densité, et donc la porosité. Cela signifie qu'à petite échelle (échelle du cylindre), la dune oolithique présente des hétérogénéités. Cela peut être corrélé avec la présence d'une seconde classe de pores identifiée en porosimétrie au mercure sur certains échantillons de EX.
- Pour le **stromatolithe** (PE), les valeurs sont très peu dispersées : faciès plus homogène, qui présente une porosité constante entre les échantillons, malgré un réseau poreux hétérogène. Pour la **calcarénite** (KE), les données ne sont pas assez nombreuses (2 échantillons) mais cohérentes avec le faciès de la roche.
- Pour les **roches dures**, une très faible dispersion des données et une corrélation avec la porosité. A l'exception de DEL.C : cela est lié au fait que c'est le faciès le plus hétérogène des calcaires durs (karsts et fracturation).

Les modules élastiques dynamiques calculés sont représentés en fonction de la porosité, en sec et en saturé, dans la **Figure 80**. On observe pour **tous les échantillons** :

- Des valeurs de V_p et V_s conformes aux faciès analysés, ce qui se traduit par un module statique E compris entre 8 et 90 GPa pour les calcaires (moyenne 50,4 GPa), et entre 3 et 38 GPa pour les grès (moyenne 13,7 GPa). Les coefficients de Poisson sont aussi cohérents (Schön 2015) (**Tableau 7**).
- L'influence de la saturation en eau est très faible pour les calcaires durs, ce qui est cohérent avec un faciès très homogène et une porosité presque inexistante. Il arrive même que les modules élastiques saturés soient plus grands que les modules secs : l'erreur de mesure est supérieure à la différence entre les valeurs à sec et saturé, et/ou un nombre insuffisant d'échantillon a été analysé.

- L'influence de la saturation est plus importante pour les faciès légers : diminution des V_p et V_s lorsque la roche est saturée, et donc des modules élastiques. Cela est cohérent avec la porosité très élevée des échantillons.

On peut deviner un comportement presque ductile pour les valeurs d'E inférieures à 20 et des coefficients de Poisson supérieur à 0,25 : les échantillons PE, KE, EX, qui sera confirmé dans les mesures mécaniques.

Sample	V_p (m/s)	+/-	V_s (m/s)	+/-	μ (GPa)	+/-	K (GPa)	+/-	Coefficient de poisson	+/-	E (GPa)	+/-
DEL.A	6472	94	3194	222	27,5	3,9	75,8	4,0	0,34	0	73,4	9,0
DEL.B	6279	188	3025	54	24,7	1,0	73,5	5,8	0,35	0	66,6	2,8
DEL.C	6178	172	3016	73	23,7	1,2	67,6	4,8	0,34	0	63,7	3,3
EX.A	3544	395	1878	397	5,5	2,8	11,7	2,0	0,3	0,1	14,1	6,2
EX.B	3264	215	1753	175	4,5	0,9	9,5	2,9	0,28	0,1	11,4	1,5
EX.C	3734	145	2074	133	6,3	0,9	12,0	2,5	0,27	0,1	15,9	1,4
EX.D	3724	495	1741	222	4,5	1,3	14,7	4,5	0,36	0	12,3	3,5
KE.A	3433	267	1794	338	5,8	2,2	13,2	0,5	0,31	0,1	15,1	5,1
PE.A	3472	130	1691	92	4,4	0,5	12,6	1,4	0,34	0	11,7	1,2

Sample	V_p (m/s)	V_s (m/s)	μ (GPa)	K (GPa)	Coefficient de poisson	E (GPa)
EX.A	3688	1414	2,8	12,2	0,39	7,9
EX.B	3153	1107	1,8	11,7	0,43	5,0
EX.D	2893	1468	3,1	8,3	0,33	8,2
DEL.A	6410	3026	23,9	79,2	0,36	65,0
DEL.B	6342	3112	25,4	74,8	0,35	68,4
DEL.C	6228	3015	23,4	70,0	0,35	63,1
PE.A	3178	1370	3,2	8,3	0,34	8,5

Tableau 7. Synthèse des mesures acoustiques sur échantillons secs (en haut) et saturés (en bas). Les écarts types ne sont pas présentés car trop peu d'échantillons ont été analysés.

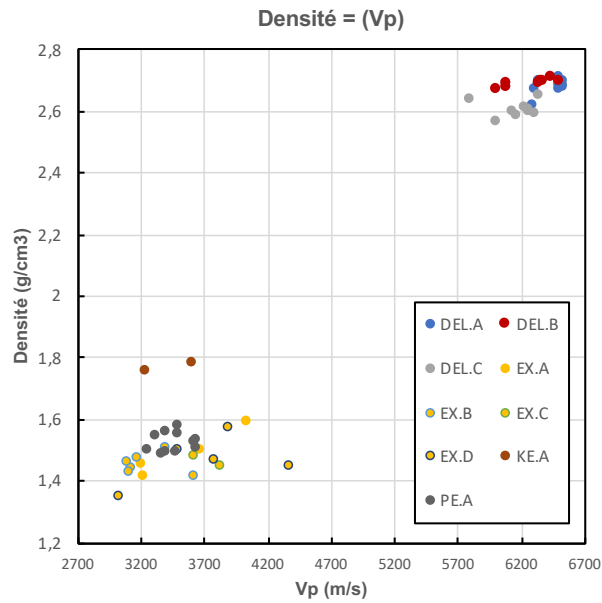


Figure 80. Densités apparentes en fonction de la vitesse des ondes P.
 Pour tous les échantillons secs : DEL.A, DEL.B, DEL.C et EX, KE, PE.

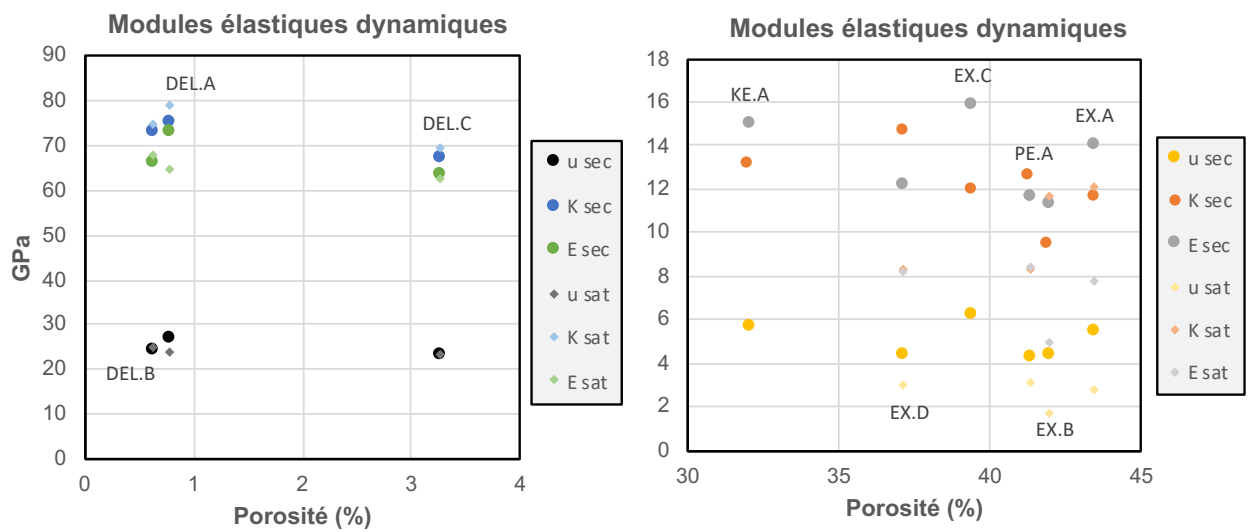


Figure 80. Modules élastiques secs et saturés, en fonction de la porosité.
 A gauche : pour les calcaire durs (DEL.A, DEL.B, DEL.C) et à droite, pour les faciès légers (EX, KE et PE), en sec (marque ronde) et saturé (marque losange).

- **Mesures mécaniques**

La résistance d'une roche est une résistance structurelle de la composition des minéraux. Elle est régie par la résistance des minéraux et la nature de la liaison entre eux (et donc de la porosité). On peut mesurer la résistance à la propagation d'une fissure ou ténacité (K en $\text{Pa}\cdot\text{m}^{1/2}$), la résistance à l'extension (σ_{ext} , en MPa) et en compression (σ_{comp} , en MPa).

Ces essais uni-axiaux sans confinement ont été réalisés sur un ensemble d'échantillons mais beaucoup n'ont pas fonctionné (voir les limitations au-dessus, en [4.3.2](#)). Les valeurs aberrantes et les échantillons mal coupés ont été mis de côté : cela doit être pris en compte pour comprendre la représentativité des mesures. Les résultats présentés dans le **Tableau 8** synthétisent :

- Pour les **essais brésiliens** (traction), 58 échantillons ont été mis en presse avec des résultats satisfaisants : 19 échantillons de DEL.A (5 saturés), 8 échantillons de DEL.B (2 saturés), 7 échantillons de DEL.C (4 saturés), 18 échantillons de EX (5 saturés), 2 échantillons de KE.A (1 saturé), 4 échantillons de PE.A (4 saturés).
- Pour les **essais de compression (UCS)**, 33 échantillons ont été mis en presse avec des résultats satisfaisants (20 % des échantillons écartés) : 8 échantillons de DEL.A (2 saturés), 6 échantillons de DEL.B (2 saturés), 6 échantillons de DEL.C (2 saturés) ; 7 échantillons de EX (3 saturés) ; 6 échantillons de PE.A (3 saturés). Aucun cylindre de KE.A n'a résisté à la découpe.
- Pour les **essais de ténacité**, 11 échantillons ont été mis en presse (60% des échantillons perdus à la découpe et/ou écartés) pour deux faciès seulement : 5 échantillons de DEL.D (=DEL.A) et 6 échantillons de EX.E (2 saturés).

N°	$\sigma_{\text{comp sec}}$ (MPa)	+/-	$\sigma_{\text{comp sat.}}$ (MPa)	+/-	E statique sec (Gpa)	+/-	E statique sat. (Gpa)	+/-
DEL.A	52,8	7,7	52,3	16,9	33,3	36,1	88,2	71,5
DEL.B	50,3	11,4	61,6	10,7	259,4	204,4	151,3	86,1
DEL.C	16,3	6,1	14,6	2,2	18,3	9,5	12,1	2,1
EX	3,0	0,6	2,3	0,8	1,5	1,0	1,0	0,3
PE.A	5,3	1,4	3,6	0,4	2,5	2,0	1,9	0,5

N°	$\sigma_{\text{ext sec}}$ (MPa)	+/-	$\sigma_{\text{ext sat.}}$ (MPa)	+/-
DEL.A	9,7	2,6	9,3	0,9
DEL.B	8,6	2,6	9,1	1,5
DEL.C	5,5	1,1	5,1	2,5
EX	1,7	0,5	1,4	0,3
KE.A	1,2	NA	1,0	NA
PE.A	1,5	0,2	1,3	0,2

N°	Pmax (N)	B (0,4-0,6)	K _{SCB} (Pa.m ^{1/2})
DEL.D1a	1000	0,41	6,15E+05
DEL.D1b	1120	0,41	8,35E+05
DEL.D2a	685	0,43	6,54E+05
DEL.D3a	848	0,48	9,87E+05
DEL.D3b	888	0,43	7,37E+05
EX.E1 (sat)	360	0,39	1,74E+05
EX.E2a	268	0,58	2,40E+05
EX.E2b (sat)	238	0,44	1,28E+05
EX.E3b	240	0,45	1,42E+05
Ex.E4a	400	0,42	2,10E+05
Ex.E4b	558	0,40	2,60E+05

Tableau 8. Synthèse des résultats des mesures mécaniques. Réalisées sur les échantillons EX, DEL.A, DEL.B, DEL.C, KE.A et PE.A. En haut : résultats des essais de compression ; au milieu : résultats des essais brésiliens ; en bas, résultats des essais de ténacité.

On observe pour **tous les échantillons** :

- Un très grand écart-type pour les mesures en UCS : il reflète la faible fiabilité des données, en particulier pour les faciès denses.
- La résistance en σ traction devrait être plus faible que la résistance en compression, avec un rapport d'environ 10% : ici, le rapport est beaucoup plus élevé (x1,7 à x5).
- De même, les modules d'Young statiques (E_{stat}), calculés à partir des essais uniaxiaux, devraient se corrélérer aux modules d'Young dynamiques (mesurés avec l'acoustique) : les mesures ici ne sont pas suffisantes, et elles sont soit aberrantes, soit beaucoup trop faibles (parfois avec un rapport de x10).

De ce fait, les données doivent être prises comme des indications et donner un ordre de grandeur. Ces mesures permettent de **comparer les faciès entre eux** et d'observer des différences macroscopiques lors de la fracturation. On observe donc :

- Des résultats cohérents avec les faciès des roches analysées, avec des comportements très différents entre les roches à forte densité et les faciès à faible densité pour les essais de compression et d'extension (facteur de l'ordre de x5 à x20).
- Des comportements très différents macroscopiquement lors de la fissuration, en UCS et essai brésilien : EX montre un comportement presque ductile (pas de fissuration) alors que les autres échantillons cassent net, même le stromatolithe (PE.A) (**Figure 81**). Dans certain cas, après une première fissuration sur les essais UCS, la valeur de résistance augmentait de nouveau jusqu'à dépasser la valeur initiale ayant induit la première fissuration. Cela pourrait s'expliquer par la très faible cimentation de EX, composé de grains ronds qui se réorganisent lors de la compaction, entraînant une diminution de la porosité et donc une augmentation (légère) de la résistance.
- La saturation diminue globalement la résistance de la roche à la pression, sans changement de comportement (la dune oolithique s'écrase, les autres se rompent).
- Pour les mesures de ténacité, les comportements aussi cohérents : on observe un rapport de x3,5 entre les faciès légers (EX.D) et les faciès denses (DEL.D). L'effet de la saturation est aussi visible sur EX.D, avec une diminution de la valeur de ténacité lorsque l'échantillon est saturé.



Figure 81. Échantillons de DEL.B et EX après les essais brésiliens.
 En haut, les calcaires durs se fendent très distinctement ; en bas, la dune oolithique s'écrase et la fissure est très peu visible.

4.4 Synthèse

Une synthèse des carrières étudiées est présentée dans le **Tableau 9**. On observe plusieurs **tendances globales** sur le type de carrière et la nature des roches extraites :

- La prédominance des carrières de roches légères (grès, travertin, calcaire tendre) (12/25), puis des calcaires durs (7/25) et des conglomérats (6/25) dans la région.
- La prédominance des carrières locales, dont la roche n'est pas exportée mais employée pour un seul site archéologique (15/21) ; ces dernières ne sont que rarement éloignées de plus de 1 km du site où la pierre est employée (**Figure 82**).
- Les roches exportées sont des calcaires durs sombres (2/4) ou des faciès légers (2/4).

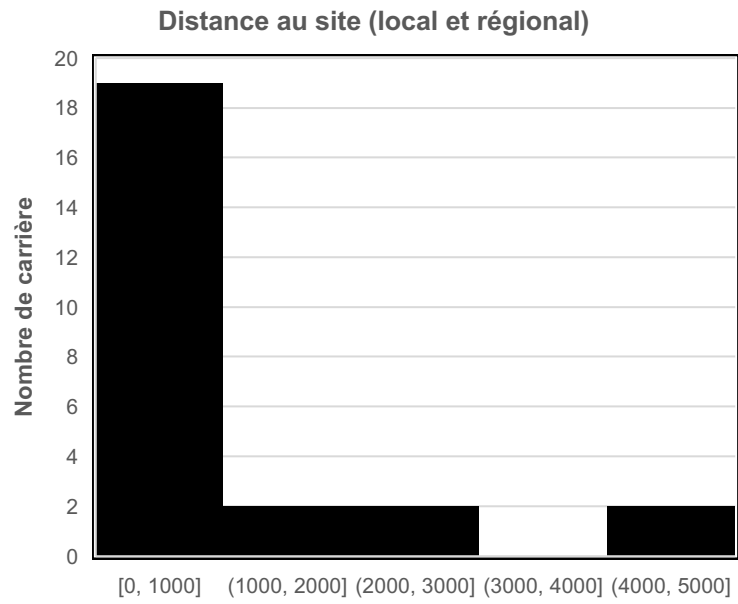


Figure 82. Répartition des carrières locales et régionales de la région de Corinthe par rapport à la distance (en mètre) entre la carrière et le site de mise en œuvre.

Q	Lieu	Surface (m ²)	Couleur	Type	Densité	Age	Utilisation	Distance au site	Altitude	Dénivelé
1	Delphes	300	Gris / gris	Calcaire dur	2,64	Jurassique / Crétacé	Locale	150	740	50
2	Delphes	400	Gris / gris	Calcaire dur	2,64	Jurassique / Crétacé	Locale	1900	570	0
3	Delphes	500	Orange / gris	Conglomérat	>2*	Quaternaire	Locale	200	570	0
4	Delphes	200	Noir / noir	Calcaire dur	2,7*	Crétacé supérieur	Locale	500	560	0
5	Delphes	500	Beige / marron	Travertin	1,6*	Quaternaire	Locale	1400	200	400
6	Delphes	10500	Gris clair / sombre	Calcaire dur	2,71	Crétacé supérieur	Régionale	5000	230	350
7	Akraiphia	100	Beige / beige	Calcaire tendre	2*	Paléocène - Eocène	Locale	10	380	0
8	Chorsiai	5 000	Gris	Conglomérat	>2*	Quaternaire (?)	Locale	10	250	0
9	Kreusis	3000	Gris	Conglomérat	>2	Pleistocène	Locale	10	20	0
10	Tanagra	x	Noir	Calcaire dur	2,7*	Jurassique / Crétacé	Exportation	+20 km	200	x
11	Mégare A	300	Blanc	Calcaire tendre	1,7*	Pliocène	x	x	360	x
12	Mégare B	x	Blanc	Calcaire tendre	1,75	Pliocène (?)	Régionale	+20 km	x	x
13	Perachora	20000	Blanc / gris	Travertin	1,62	Pleistocène	Locale	100	10	0
14	Perachora	40 000	Blanc	Calcaire tendre	1,7*	Quaternaire	x	x	x	x
15	Corinthe	2000	Orange / gris	Conglomérat	>2*	Pleistocène	Locale	1000	80	0
16	Examilia	100000	Jaune	Grès	1,51	Pleistocène	Exportation	+50 km	80	x
17	Sicyone	300	Orange / gris	Conglomérat	>2	Pleistocène	Locale	100	200	30
18	Rachi	1000	Jaune	Grès	1,6*	Pleistocène	Locale	10	95	45
19	Isthmia	500	Jaune / gris	Conglomérat	>2*	Pleistocène	Locale	500	70	20
20	Kenchrees A	40000	Jaune	Grès	1,7*	Pleistocène	Locale	2500	85	0
21	Kenchrees B	30000	Jaune	Grès	1,79	Pleistocène	Locale	2500	30	20
22	Kléonai	500000	Blanc / beige	Travertin	1,66	Quaternaire	Régionale	5000	250	20
23	Argos	1000	Noir / gris sombre	Calcaire dur	2,7*	Eocène	Exportation	+50 km	400	380
24	Leventochori	20000	Blanc / beige	Grès	1,65	Quaternaire	x	x	5	x
25	Eleusis	x	Bleu sombre	Calcaire dur	2,7*	Jurassique / Crétacé	Exportation	+20 km	10	150

Tableau 9. Carrières étudiées dans la région du Golfe de Corinthe.

Une synthèse des principales propriétés des roches étudiées est présentée dans le **Tableau 10**. Les résultats sont tous cohérents avec le faciès analysé. Seule la dune oolithique présente des caractéristiques particulières avec une densité particulièrement faible et une porosité très élevée. Son réseau poreux unimodal est défini par une classe de pore dominante, responsable de la majorité de la porosité, et une texture homogène (grains ronds très bien trié, faible cimentation), ce qui pourrait expliquer son comportement ductile. Les données sont cependant insuffisantes pour pouvoir les comparer entre elles.

N°	Composition	Densité (g/cm ³)	Porosité à l'eau (%)	Porosité au mercure (%)	$\sigma_{ext\ sec}$ (MPa)	$\sigma_{comp\ sec}$ (MPa)	$\mu\ sec$ (GPa)	K sec (GPa)	E (GPa)	Réseau
EX	Ca, Qz (Ar, Kao, And, Al)	1,5	40,5	37,8	1,7	3,0	5,2	12,0	13,4	Unimodal
KE.A	Ca, Qz (Kao)	1,7	32,1	28,7	1,2	NA	5,8	13,2	15,1	Unimodal
PE.A	Ca (Qz, Ara, Kao)	1,5	41,3	38,4	1,5	5,3	4,4	12,6	11,7	Hétérogène
DEL.A	Ca	2,7	0,8	0,5	9,7	52,8	27,5	75,8	73,4	Hétérogène
DEL.B	Ca, Qz (Kao)	2,7	0,6	0,5	8,6	50,3	24,7	73,5	66,6	Hétérogène
DEL.C	Ca (Qz)	2,6	3,3	1,6	5,5	16,3	23,7	67,6	63,7	Hétérogène

Tableau 10. Propriétés physiques des roches étudiées dans la thèse.

5 La pierre à Delphes

Sommaire

5.1 Introduction

[5.1.1 Buts et organisation du chapitre](#)

[5.1.2 La classification des roches](#)

[5.1.3 Les études antérieures sur la pierre à Delphes](#)

5.2 Les matériaux locaux de Delphes

[5.2.1 Les calcaires du Parnasse](#)

[5.2.2 Les calcaires lités](#)

[5.2.3 Le calcaire à rudistes](#)

[5.2.4 La brèche de pente](#)

[5.2.5 Le flysch jaune](#)

5.3 Les matériaux régionaux à Delphes

[5.3.1 Le travertin de la Vallée du Pléistos](#)

[5.3.2 Le calcaire de Saint-Élie](#)

[5.3.3 Le marbre noir de Livadia](#)

5.4 Les matériaux allochtones

[5.4.1 Les marbres blancs des îles et de l'Attique](#)

[5.4.2 La dune oolithique de Corinthe](#)

[5.4.3 Le calcaire coquillier de Mégare](#)

[5.4.4 Les pierres calcaires noires](#)

5.5 Les matériaux d'origine inconnue

5.6 Synthèse : les matériaux dans les monuments

[5.6.1 Volumes de roche mis en œuvre](#)

[5.6.2 Évolution de l'utilisation des pierres dans le temps et l'espace](#)

Ce chapitre 5 a vocation à faire partie d'un ouvrage à paraître : la monographie « La pierre à Delphes, de l'extraction à la mise en œuvre. Géologie, matériaux et techniques », sous la direction d'A. Perrier, dans la collection *Fouilles de Delphes, Topographie et Architecture*, de l'EFA.

Dans l'optique de la publication prochaine, il a été rédigé suivant les règles d'écriture adéquates à la collection où il sera publié. La numérotation des sections, des figures et des tableaux suit cependant celle de la thèse pour faciliter la lecture de l'ensemble.

Concernant les sujets abordés, il se peut que certaines parties répètent des paragraphes préalables. En particulier, trois calcaires durs employés à Delphes ont fait l'objet d'analyses pétrographiques, ainsi qu'un faciès léger (voir [4.3](#)).

Delphes est le seul site où nous avons des autorisations pour pouvoir réaliser une analyse plus poussée des matériaux de construction. Les marbres n'ont pas été étudiés, puisque ma thèse concernait les pierres calcaires : ils sont donc mentionnés succinctement, mais aucune approche scientifique n'a été menée pour en retrouver l'origine. Les mentions aux chapitres ou annexes de la thèse, lors de la finalisation de l'ouvrage, seront évidemment retirées, au profit des références pour les autres chapitres de l'ouvrage : ils concernent respectivement le contexte géologique (chapitre 1), les carrières (chapitre 2) et la mise en œuvre des matériaux (chapitre 4). Ce chapitre correspondra au chapitre 3, « Les matériaux de construction ».

Ainsi le contexte géologique n'est pas explicité ici : il faut voir la **Figure 9** dans l'introduction, qui replace Delphes dans son environnement ([1.2.3](#)). Le site est construit sur un terrain en pente (environ 30°) soit sur les formations éocènes (flyschs), soit sur des brèches de pente récentes. En Annexe C, des plans de Delphes sont présentés avec les noms et les numéros des monuments étudiés, tirés du Guide de Delphes (Bommelaer et Laroche, 2016) qui sert de référence tout le long du texte (**Annexe** , **Annexe**) et de la dernière publication concernant Marmaria (**Annexe**) (Huber *et al.*, 2022).

La rédaction est finalement peu différente de tout autre texte scientifique, à part quelques points de formulation qui sont inhabituels en sciences naturelles :

- L'utilisation des notes de bas de page, pour indiquer les références ou des commentaires, est la principale particularité du texte présenté ci-dessous. La référence est citée une première fois entièrement, puis uniquement par le nom et la date de l'auteur.
- L'ouvrage est aussi une monographie destinée à des archéologues : les termes géologiques seront donc définis le long du texte, mais aussi grâce à un glossaire (en [Annexe E](#)).
- La méthodologie n'est pas décrite explicitement, mais elle est identique à celle décrite dans la thèse (voir la [partie 2](#)).

5.1 Introduction

5.1.1 Buts et organisation du chapitre

Cette partie sera dédiée à la présentation des pierres employées pour la construction, dans les sanctuaires d'Apollon et d'Athéna Pronaia (ou Marmaria), le gymnase et le stade du site archéologique de Delphes (**Annexe**). Chaque roche sera décrite, sa provenance détaillée, qu'elle soit assurée ou hypothétique, et leur utilisation précisée : volumes mis en œuvre, répartition et évolution dans le temps et l'espace. Un premier article, publié en 2020¹, présente succinctement les principales roches employées. Dans ce chapitre, la description des pierres sera détaillée au vu du contexte géologique et archéologique et comme la finalisation de plusieurs années de recherche² : le but est de fournir les clefs nécessaires pour l'identification des pierres sur le terrain et présenter une synthèse des provenances et des transports de pierres vers Delphes.

Pour chaque roche, les principaux critères de reconnaissance macroscopique (ce que l'on voit à l'œil nu et à la loupe) sont exposés, accompagnés d'une description microscopique (en lames minces) et des données minéralogiques et pétro-mécaniques, quand cela était possible³. Elles permettent de déterminer le contexte de formation, possiblement son âge, et par extension sa provenance, ou proposer une hypothèse si aucun critère diagnostique n'a pu être établi. En étudiant le comportement mécanique, nous approcherons d'autres notions, comme la

¹ De Vals, M., Gastineau, R., Rubi, R., Perrier, A., Moretti, I., 2020. The stones of the Sanctuary of Delphi – Northern shore of the Corinth Gulf – Greece, in: *BSGF - Earth Sciences Bulletin*. Voir dans la thèse : la partie [3.3](#).

² Depuis 2017, les matériaux de construction ont été étudiés dans le cadre de stages de master, et finalement pour la thèse de M. de Vals (2019-2022) intitulée « Emploi de la pierre en Grèce antique autour du Golfe de Corinthe », Sorbonne Université, Paris. Voir les rapports : R. Gastineau, 2017. « Carte géologique et caractérisation lithologique des édifices du site archéologique de Delphes, Grèce ». Mémoire de Master 1, Université Grenoble Alpes ; M. de Vals, 2018. « La pierre à Delphes. Axe Géologie ». Mémoire de Master 1, Université Claude Bernard Lyon 1 ; M. de Vals, 2019. « Étude préliminaire sur l'utilisation de la pierre dans le sanctuaire de Delphes, Grèce. Contexte géologique et provenance ». Mémoire de Master 2, Université Claude Bernard Lyon 1.

³ Les analyses en laboratoire sont réalisées lorsque la carrière d'origine a été déterminée, ce qui permet d'échantillonner : de la diffraction de rayon X (DRX) pour la composition minéralogique, et des mesures pétro-mécaniques. Ces dernières permettent de caractériser le comportement des roches face à différentes contraintes : principalement, l'eau et la pression (compression, torsion, étirement, fendage).

qualité de la roche comme matériau de construction⁴. Enfin, il a semblé pertinent d'identifier les principales formes d'altération associées à chaque faciès, car elles peuvent changer l'aspect de la roche de façon significative. Les phénomènes physico-chimiques n'ont pas été étudiés : nous présentons uniquement des données descriptives, basées sur le glossaire illustré des formes d'altération de la pierre (ICOMOS)⁵ et qui sert de référence dans ce domaine.

Les faciès locaux de Delphes seront d'abord présentés, puis les faciès régionaux et allochtones. Les pierres *locales* sont celles directement disponibles, généralement extraites du substrat et qui n'ont donc pas nécessité de transport. Les pierres *régionales* proviennent des environs de Delphes, dans sa sphère d'influence culturelle et/ou politique⁶ : elles ont été transportées sur quelques kilomètres. Les pierres *allochtones* correspondent à toutes les autres, transportées parfois sur plusieurs centaines de kilomètres, par voie terrestre ou maritime. Les roches régionales et allochtones ont donc été choisies, le transport de pierre n'étant pas anodin en termes de coût financier, sur des critères à définir (esthétique, économique, historique, géotechnique)⁷.

Ces termes - local, régional et allochtone - sont donc liés au site étudié, à sa position géographique : ils ne sont applicables qu'à Delphes. Enfin, les roches dont la provenance n'a pas pu être déterminée seront décrites et des hypothèses seront proposées. Ce chapitre se finit sur une approche plus quantitative, avec les estimations volumiques de chaque faciès et une synthèse sur l'évolution de l'emploi des roches dans le temps et l'espace.

⁴ Ce point sera développé dans le chapitre 4 de l'ouvrage cependant.

⁵ *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Il sera cité ainsi : ICOMOS, 2008.

⁶ Pour Delphes, cela s'étend à la Phocide.

⁷ Il est difficile de savoir si la pierre en elle-même avait un coût, ou si l'extraction, le transport, la mise en œuvre, représentaient les principales dépenses et dans quelles proportions. En plus de l'aspect financier, et ostentatoire qui en découle, une roche pouvait aussi être choisie sur des critères esthétiques ou techniques : facilité de taille, polissage... Voir Burford, A., 1969. *The Greek temple builders at Epidauros: a social and economic study of building in the Asklepian sanctuary, during the fourth and early third centuries B.C.*, University of Toronto Press, pp. 294; et Mathé, V., 2010. *Le prix de la construction en Grèce aux IV^e siècle et III^e siècles avant J.-C. : étude sur les chantiers financés par les sanctuaires de Delphes, d'Épidaure et de Délos*, Thèse à l'Université Lumière Lyon 2.

5.1.2 La classification des roches

Dans la littérature, les ouvrages de R. Martin⁸ et A. Orlandos⁹ font référence pour les matériaux de construction employés dans l'architecture grecque. Dans le chapitre sur la pierre, ils divisent les roches en six catégories¹⁰, classification sommaire mais qui reflètent une réalité pratique : des roches visuellement différentes, qui se travaillent différemment.

Selon la formule de Le Tallec¹¹, les sciences modernes ont introduit une définition des pierres que les Anciens ignoraient : plutôt, un autre degré de précision sur la nature même de la roche (âge, processus de formation, basées sur des mesures quantitatives et des descriptions à l'échelle microscopique). Si la description systématique et rigoureuse des roches est aujourd'hui la base de toute étude géologique, il faut rester prudent et ne pas transposer nos conclusions directement à l'Antiquité. Il est en effet probable que la provenance, le poids ou la couleur de la roche aient influencé le choix des maçons grecs, au contraire de son âge ou sa composition minéralogique. Dans les comptes de construction de grands chantiers comme Delphes, Délos ou Épidaure, les roches étaient nommées parfois par leur provenance¹², avec assez peu de précision sur la nature même de la roche, même si les termes « marbre », « calcaire » ou « pôros » étaient utilisés¹³.

Pourquoi alors préciser la nature des roches et ses principales caractéristiques physiques ? Cela a été très bien résumé par J.C. Bessac¹⁴ :

Les aspects techniques de la recherche archéologique en carrière sont essentiels et touchent plusieurs secteurs. Le premier concerne la roche, son esthétisme (couleur, veinage, possibilités de polissage), ses caractéristiques techniques dans la carrière comme dans le processus de transformation (élaboration de matériaux de construction, d'objets

⁸ Martin, R., 1965. Manuel d'architecture grecque. I : Matériaux et techniques. Éditions A. et J. Picard, Paris, pp. 522.

⁹ Orlandos, A., 1969. Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs II. Travaux et Mémoires. E. de Boccard, Paris, pp. 317.

¹⁰ Martin, 1965, p.112 : Brèche et conglomérat ; tuf ou poros ; granit ; gneiss ; calcaires ; marbre ; et une dernière, pierres diverses. Orlandos, 1969, ne mentionne pas les granits et les gneiss.

¹¹ Le Tallec, Y., 2014. Les carrières de roches marbrières de la péninsule du Magne. Géographie et Histoire, p.150 : « Les sciences exactes ont en effet introduit une définition du marbre que l'Antiquité ignorait ». Cela s'applique aussi aux autres types de roche.

¹² Voir aussi Brun, P., 1997. Du fromage de Kythnos au marbre de Paros : la question des appellations contrôlées (?) dans l'Antiquité grecque, in : Revues des Études Anciennes, 99, 3, p. 401-409.

¹³ Voir dans Mathé, 2010, pour des traductions des comptes de construction.

¹⁴ Bessac, J.-J., Sablayrolles, R., 2002. Problématique archéologique des carrières antiques en Gaule. In : Gallie, 59, p. 3-9.

rituels ou funéraires, sculpture, épigraphie, etc.). Si la définition géologique de la pierre est indispensable aux recherches sur la diffusion de la production de la carrière, la caractérisation du matériau du point de vue des spécialistes de la construction (bâtiments, travaux publics) est tout aussi importante pour pouvoir apprécier les choix des carriers antiques en matière d'implantation et de stratégie de progression de leurs exploitations.

L'approche géotechnique permet de mesurer les propriétés des roches, qu'il faut ensuite comparer entre elles et avec la façon dont les pierres sont utilisées dans la construction, pour rapprocher les connaissances que les constructeurs possédaient, mais qu'ils avaient acquises avec l'expérience. Par exemple, une roche qui présente des difficultés à l'extraction, une mise en œuvre difficile ou une faible durabilité sera sûrement abandonnée au profit d'une autre. En d'autres termes scientifiques, c'est une roche qui se fissure ou se fracture facilement (comportement mécanique), qui est mal cimentée ou qui possède une proportion de minéraux argileux importante, ce que l'on considère aujourd'hui comme un mauvais matériau de construction.

Si la classification employée actuellement est trop générale, utiliser une classification purement géologique n'a pas de sens non plus. Il est cependant nécessaire de passer par une description systématique car elle permet de retrouver la provenance exacte, ou de proposer des hypothèses : ce sera la base de l'étude des transports et des échanges. Mais un autre classement est nécessaire, qui sera plus proche des réalités des constructeurs grecs, et qui nous permettrait de comparer les monuments au sein d'un site, mais aussi entre les sites¹⁵. Comprendre ce qu'il se passe à un endroit précis, à Delphes par exemple, se fait aussi au travers de la comparaison à une échelle plus large.

Ce classement permettra d'étudier le choix des roches, en fonction de leur origine, utilisation et nature géologique. Il a été au-dessus défini l'origine des roches : local, régional, ou allochtone. L'utilisation dans les monuments est définie dans une partie ultérieure¹⁶. La nature des roches peut être classée ainsi : les conglomérats, les calcaires durs, les marbres, et pour remplacer le terme « *pôros* », le travertin, le grès et les calcaires tendres.

¹⁵ C'est en partie le travail réalisé dans la thèse : il est ici appliqué à Delphes. La classification décrite en [2.2.1](#) est reprise.

¹⁶ Voir [5.6.1](#).

Le manque de définition du terme « *pôros* » a été soulevé très tôt, dès le XIXe siècle, par les archéologues¹⁷, géologues¹⁸ et géographes¹⁹. Récemment, le géologue Ch. Hayward décrit très justement le problème de terminologie lié à ce mot²⁰. Il est employé pour désigner des roches variées mais sans unité géologique : le « *pôros* » s’oppose aux marbres et aux roches dures, et se définit par son utilisation architectonique et sa faible durabilité dans le temps. Ce terme est utilisé car très pratique pour englober des pierres aux propriétés similaires, mais son emploi efface la diversité des pierres qu’il désigne : les calcaires marins coquilliers, les dunes oolitiques, les travertins, les stromatolithes, les dépôts volcano-clastiques et les grès au sens strict (bioclastiques, quartzites...), sont tous appelés « *pôros* » alors qu’ils sont différents et d’origines variées. Aujourd’hui, employer ce terme signifie perdre les informations archéologiques qui découlent de cette diversité de roches.

Ainsi, le classement mis en place est pour l’instant spécifique à la région du Golfe de Corinthe, et à Delphes : il n’y a que des roches sédimentaires dans la région²¹. Aucune roche magmatique n’est présente à l’affleurement et n’a été importée²², et parmi les roches métamorphiques, uniquement les marbres ont été employés.

De ce fait, la description des pierres de construction sera basée sur la classification géologique des roches sédimentaires. Le classement génétique est le plus utilisé, c’est-à-dire en

¹⁷ Blümmer, H., 1884. Technologie und Terminologie der Gewerbe und Künste bei Griechen und Römern, Band 3, Leipzig, Berlin, p.57-58. Waldstein, C., Washington, H., 1891. Excavations by the American School at Plataia in 1891, in: The American Journal of Archaeology, 7, 4, p. 195 ; Pomtow, H., 1907. Gesteinsproben von den delphischen Bauten und Weihgeschenken, in: Philologus : Zeitschrift für das Klassische Altertum, p.286 ; Washington, H., 1922. Excavations at Phlius in 1892, in: The American Journal of Archaeology, p.446.

¹⁸ Lepsius, R., 1890. Griechische Marmorstudien, Könige. Akademie der Wissenschaften, p. 128. Philippon, A., 1892. Der Peloponnes. Versuch einer Landeskunde auf geologischer Grundlage, R. Friedländer, p. 416 ; Fuchs, T., 1877. Studien über die jüngeren Tertiärbildungen Griechenlands, Kaiserl.-Königl. Hof- und Staatsdr., p. 10.

¹⁹ Ross, L., 1855. Archäologische Aufsätze, ed. B.G. Teubner, p. 88 ; Neumann, K., Partsch, J., 1885. Physikalische Geographie von Griechenland: mit besonderer Rücksicht auf das Alterthum, ed. W. Koebner, p.261.

²⁰ Hayward, Ch., 2003. The geology of Corinth: Study of a basic resource, in: Corinth XX. The Centenary, 1896-1996, eds. Bookidis et Williams, ed. The American School of Classical Studies at Athens, pp. 15-42.

²¹ Voir le contexte géologique, dans l’ouvrage le chapitre 1, ici en [1.2.3](#).

²² Ce n’est actuellement pas vrai : de l’andésite se trouve employée dans le sanctuaire de Poséidon, à Kalaurie sur l’île de Poros, qui proviendrait de l’île même, ou de Méthana, qui sont des anciens volcans. Cependant, c’est la seule exception et dans le cadre de la thèse, elle a été ignorée.

fonction du mécanisme de formation de la roche. On différencie les roches détritiques, issues de l'altération d'autres roches (qui correspond à plus de 80% des roches sédimentaires), des roches biogènes (issues d'une activité biologique), biogéochimiques et issues de processus physico-chimiques (alliant ou non la biologie). Il existe aussi les roches qui recouvrent plusieurs catégories : les roches volcano-clastiques sont des roches détritiques, mais composées de matériel volcanique, éventuellement érodées et déplacées par l'action du vent ou de l'eau.

La classification des roches sédimentaires reste complexe et de nombreux termes sont utilisés pour décrire la composition chimique, la proportion des différents minéraux, la texture, la taille des grains, leur forme, l'organisation des grains entre eux, le type de porosité (l'espace vide dans la roche), les figures sédimentaires, la nature du ciment liant les grains, le milieu dans lequel la roche s'est formée, les fossiles présents²³. Ainsi, un glossaire est mis en annexe pour définir le vocabulaire géologique employé dans la description des matériaux.

On peut décrire rapidement les principaux termes de la classification mise en place :

- Le **marbre** désigne des roches métamorphiques, issues des calcaires, et non pas toutes les roches qui peuvent se polir, contrairement à la définition des marbriers modernes.
- Un calcaire correspond à une roche composée majoritairement de calcite. La précision de « **calcaire dur** » sert à isoler les faciès fins qui présentent une forte densité et une faible porosité, qui ont subi un enfouissement important (ils sont compacts), des autres roches de composition calcitique. Ils sont décrits alors selon leur milieu de dépôt, les éléments et les fossiles caractéristiques.
- Ainsi, les « **calcaires tendres** » regroupent les faciès fins présentant une porosité plus importante, mais qui n'ont pas subi une diagenèse poussée : ils sont donc généralement plus jeunes que les calcaires durs. Ils sont aussi décrits par leur milieu de dépôt, les éléments et les fossiles caractéristiques.
- Un **conglomérat** est une roche sédimentaire détritique, qui présente des clastes de taille supérieure à 2 millimètres liés par une matrice : si les clastes sont anguleux, c'est une *brèche* ; sinon, c'est un *poudingue*.
- Si les éléments sont plus petits que 2 millimètres, c'est un **grès** : on précise alors la nature des grains, leur forme, leur taille, la matrice qui lie les grains entre eux, et l'organisation

²³ Un ouvrage de référence pour la classification des roches carbonatées est Flügel., E., 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*, Springer-Verlag. C'est une synthèse claire et moderne.

des différents éléments entre eux. Ils peuvent donc être des calcaires : si plus de 50% de la roche est composée de calcaire, on parle de calcarénite.

- Par **travertin**, on regroupe toutes les roches calcaires continentales biogéniques : formées en eau chaude (travertin), en eau froide (tuf), dans des contextes variés (lac, karst, rivière), par la précipitation de CaCO_3 présent dans l'eau. Il prend en compte des formations calcaires variées avec des caractéristiques parfois très différentes, mais qui ont comme point commun d'être plutôt grossières (tubulaire), légères, et de couleur blanche.

5.1.3 Les études antérieures sur la pierre à Delphes

S'il n'existe pas de synthèse sur les pierres employées dans la construction monumentale delphique, la nature et l'origine des pierres restent cependant un sujet qui intéresse, sans avoir donné lieu à une littérature prolifique.

L'archéologue allemand Hans Pomtow, avec le géologue allemand Richard Lepsius, sont les premiers à avoir réalisé une étude systématique des pierres employées dans le site de Delphes, publié en 1907 dans *Philologus*²⁴. Sur un ensemble de monuments et de sculptures, ils ont prélevé 164 échantillons : 76 *pôros*, 2 brèches, 17 calcaires durs et 63 marbres. Les morceaux ont été divisés en deux, et un exemplaire de chaque échantillon a été envoyé au musée de Darmstadt pour intégrer la collection personnelle de R. Lepsius²⁵. L'autre moitié des échantillons semble avoir été perdue²⁶. Les échantillons de Delphes ont été retrouvés aujourd'hui dans la *Lepsius Marble Collection*, au *Hessische Landesmuseum von Darmstadt* : visitée en juin 2021, on y trouve 160 échantillons des 164 inventoriés (2 disparus, 2 étaient des terres cuites) (**Figure 83**).

Richard Lepsius identifie, sur des critères macroscopiques et l'étude de lames minces, six types de *pôros* différents, trois calcaires (dont celui de Saint-Élie) et cinq marbres (Paros, Naxos, Pentélique, Hymette, et un inconnu). Aucune provenance de *pôros* n'a été définie de façon sûre, à l'exception du calcaire oolithique de Corinthe (Poros I). Il décrit ainsi un calcaire

²⁴ Pomtow, 1907, p.260-286.

²⁵ Pomtow, 1907, p.262: « Die Probestücke selbst sind halbiert worden und die eine dieser beiden Kollektionen ist Herrn Gheimrat Lepsius für seine große Sammlung griechischer Gesteine zur Verfügung gestellt, die er im Großherzogl. Landesmuseum zu Darmstadt angelegt hat. »

²⁶ D'après A. Jacquemin, au détour d'une conversation à la maison de fouilles de Delphes en 2021, cette seconde collection aurait été envoyée à Berlin, puis perdue pendant la seconde guerre mondiale.

bioclastique avec une matrice rouge (Poros II) ; un grès jaune-marron (Poros III) ; une marne jaune marron claire (Poros IV) ; un calcaire coquillier (Poros V) ; et un travertin local (Poros VI)²⁷.



Figure 83. La collection du géologue R. Lepsius.

Aujourd'hui au Hessische Landesmuseum von Darmstadt : tiroir de la Lepsius Marble Collection contenant une partie des échantillons provenant de l'étude réalisée avec H. Pomtow à Delphes et publiée en 1907.

Une partie des échantillons présents dans la collection ont été empruntés et étudiés : les « pôros », les calcaires et les brèches. En se basant sur les descriptions de H. Pomtow, les échantillons ont été associés aux monuments dans la mesure du possible. En effet, l'auteur n'a pas toujours donné les détails nécessaires pour identifier l'endroit exact où l'échantillon a été pris et les connaissances du site entre le début du XIXe siècle et aujourd'hui ont beaucoup évolué²⁸. De plus, certains échantillons ont été pris sur des blocs errants, sans numéro d'inventaire, parfois déplacés ou perdus depuis.

Cette collection est aujourd'hui devenue une collection historique, dont il faut préserver l'intégrité. Mais elle reste une ressource précieuse, puisqu'elle donne accès à des échantillons propres, avec une cassure fraîche, pris systématiquement sur chaque monument connu, transportable et étudiable en laboratoire.

²⁷ Pomtow, 1907, p.268-271 : les termes (Poros I, Poros II, ...) et les courtes descriptions sont repris de l'article.

²⁸ Par exemple, le trésor de Corinthe est aujourd'hui associé à la fondation SD 308a, alors qu'aux temps de Pomtow, cette fondation n'avait pas été découverte et le trésor était identifié sur la fondation SD 209.

Depuis l'étude de Pomtow, les pierres de construction ont assez peu intéressé : les calcaires ont été mis de côté²⁹ et les marbres dans le bâti ont seulement fait l'objet d'analyses ponctuelles³⁰. La diversité des roches avait été observée : les différents marbres, calcaires de couleurs, *pôros* de textures variées, ont été décrits, mais non documentés systématiquement. Par conséquent, les répercussions historiques de cette diversité de roche à l'échelle du site n'ont jamais pu être étudiées précisément. Les matériaux étaient généralement définis comme ci-dessous.

On considérait que les marbres blancs à grains très fins provenaient de Paros, comme pour la construction de l'intégralité du trésor des Athéniens³¹. Les marbres de Naxos et du Pentélique ont été employés ponctuellement, respectivement pour le Sphinx des Naxiens³² et la Tholos³³ : plus grossier que celui parien pour le premier, le second possède un litage et des

²⁹ A partir de 1988, Marie-Dominique Nenna et Didier Laroche entament une étude des monuments en *pôros* du sanctuaire de Delphes, malheureusement inachevée. Deux articles seront publiés : en 1990, « Le trésor de Sicyone et ses fondations », in : BCH 114, 1, pp.241-284 et en 1993, « Études sur les trésors en *pôros* à Delphes », in : Les grands Ateliers d'architecture dans le monde égéen du VI^e siècle av. J.-C. Actes du colloque d'Istanbul, 23-25 mai 1991, éd. J. de Courtils et J.-Ch. Moretti. Istanbul : Institut Français d'Études Anatoliennes-Georges Dumézil, 1993, pp. 227-245. Au début des années 1990, une thèse a été débutée à l'Université polytechnique nationale d'Athènes par E. Kolaiti, intitulée « Building and decorative stones of the antiquities of Delfi and their provenance quarries ». Malheureusement, elle n'a donné lieu qu'à une publication : Papageorgakis, J., Kolaiti, E., 1992. The Ancient limestone quarries of Profitis Elias near Delfi, in: Ancient Stones: quarrying, trade and provenance. Interdisciplinary Studies on Stones and Stone Technology in Europe and Near East from the Prehistoric to the Early Christian Period, eds. M. Waelkens, N. Herz, L. Moens, Leuven University Press, 1992. Cette thèse a été arrêtée pour des raisons professionnelles (communication personnelle d'E. Kolaiti) et les données n'ont jamais été publiées ; E. Kolaiti conserve chez elle des lames minces d'échantillons pris sur les monuments de Delphes mais ne nous a pas accordé un accès au matériel.

³⁰ On peut noter quelques publications traitant de ces problématiques : Déroche, V., Mandi, V., Maniatis, Y., Nikolaou, A., 1989. Identification de marbres antiques à Delphes, in : BCH 113, 1, pp.403-416 ; Palagia, O., Herz, N., Investigation of marbles at Delphi, in : *ASMOSIA V*, éd. J.J. Herrmann, N. Herz, R. Newman, Archetype Publication Ltd, London, 2002, pp.240-249. Enfin, Aurigny, H., Braunstein, D., Martinez, J.-L., 2016. Sculpture de Delphes, in : *BCH*, 139-140, 2, pp. 784-794 : article synthétique traitant de la sculpture mais mentionnant la provenance des marbres employés, sur les observations des géologues A. et Ph. Blanc (Sorbonne Université).

³¹ Audiat, J., 1933. Fouilles de Delphes, Topographie et architecture, « Le trésor des Athéniens », 2, 9, E. de Boccard, p. 8

³² Amandry, P., 1953. Fouilles de Delphes, Topographie et architecture, « La Colonne des Naxiens et le Portique des Athéniens », 2, 11, E. de Boccard, p. 8

³³ Palagia et Herz, 2002, p. 245

veines de muscovite très caractéristiques. Le trésor de Siphnos³⁴ emploie en partie du marbre provenant de l'île, reconnaissable par son litage et sa couleur bleutée. Le marbre noir de Livadia a été utilisé à une époque plus tardive dans l'Agora et le Gymnase, pour la colonnade³⁵.

Les calcaires durs étaient identifiés par leur couleur ou leur qualité, sur des descriptions souvent subjectives³⁶. On peut noter la description du calcaire de Saint-Élie par Jean Bousquet, « d'un gris tourterelle qui s'est faiblement patiné de rose et d'or ; la teinte est moins bleuâtre et plus cendrée qu'un trésor de Thèbes et au grand Temple »³⁷. On le différenciait donc des autres calcaires moins beaux, du Parnasse et des calcaires sombres³⁸. La brèche était généralement bien identifiée, son utilisation appuyant une datation basse pour certains monuments³⁹.

Enfin, parmi les *pôros*, parfois aussi appelé « tuf »⁴⁰, uniquement le dune oolithique de Corinthe était reconnu. Les autres *pôros* étaient décrits⁴¹, mais l'identification et la provenance restaient incertaines.

5.2 Les matériaux locaux de Delphes

5.2.1 Les calcaires du Parnasse

Le premier faciès présenté compose la falaise surplombant Delphes, les Phédriades. Il est habituellement appelé « calcaire du Parnasse » : cependant il faut y ajouter une nuance, et parler des calcaires du Parnasse, au pluriel.

³⁴ Daux, G., Hansen, E., 1987. Fouilles de Delphes, Topographie et architecture, 2, 14, « Le trésor de Siphnos », E. de Boccard, p. 26

³⁵ Déroche et al., 1989. Identification des marbres antique à Delphes. BCH 113,1, pp.403-416.

³⁶ Par exemple, Homolle, T., 1897, Topographie de Delphes, in : BCH 21, pp. 256-420. Concernant le mur est du péribole, l'enceinte sacrée du sanctuaire : « La matière employée est la pierre du pays, un calcaire dont la couleur varie du noir au bleu, au vert, au jaune et au rouge, mais qui se revêt à l'extérieur, sous l'influence de l'air et de l'eau et une oxydation ferrugineuse, d'une patine dorée. », pp.258-259.

³⁷ Bousquet, J., 1952. Fouilles de Delphes, Topographie et architecture, 2, 8, « Le trésor de Cyrène », E. de Boccard, p.24.

³⁸ Pour plus de détails sur les calcaires sombres, voir la partie « Les pierres noires », dans la thèse : [5.4.4](#).

³⁹ Homolle, 1897, pp. 577-578, indique qu'il était utilisé en grande quantité qu'à partir du IV^e siècle.

⁴⁰ Comme pour le « Temple en tuf » (SD 29) à Marmaria.

⁴¹ Laroche et Nenna, 1993, pp. 231-234.

Ce terme recouvre les faciès extraits de la plateforme carbonatée datée du Jurassique – Crétacé, sur laquelle le site est construit⁴², mais il se définit aussi par opposition aux trois autres faciès provenant de la plateforme, qui correspondent à des formations géologiques plus restreintes avec des caractéristiques particulières⁴³. Les calcaires du Parnasse correspondraient à la roche « par défaut » : celle directement accessible, sans qualité technique ou esthétique⁴⁴ particulière, avec la brèche de pente⁴⁵.

Ces faciès ont été extraits tout le long de la falaise et sur des blocs tombés autour du site. Des traces d'extraction ont été observées jusqu'à 500 mètres à l'ouest de Delphes, avec la zone la mieux conservée, la carrière du Stade, et jusque 2 kilomètres à l'est, avec la carrière dite de Logari⁴⁶.

Le massif rocheux des Phédriades présente au moins deux types de discontinuités principaux : des joints stratigraphiques (liés à la stratification naturelle de la roche) et des diaclases (**Figure 84**, A et B). S'ajoutent à cela les fracturations liées au système de la faille Arachova – Delphes – Amphissa. Il est difficile de faire la différence entre les discontinuités : P. Birot attribue les versants sub-verticaux de la falaise aux diaclases ou aux plans de faille⁴⁷. Dans ce réseau va s'engager l'eau et des figures de dissolution de petite et grande échelle très caractéristiques s'observent à l'affleurement : micro-karts, lapiaz et karst (**Figure 84**, c et d). Ainsi la roche présente un degré de fracturation très important, ce qui explique des chutes et des éboulements récurrents. La taille des blocs extraits va dépendre des discontinuités et de leur espacement : ils peuvent atteindre ici au maximum 2 mètres⁴⁸.

⁴² Voir le Chapitre 1, Contexte géologique, de l'ouvrage ; pour la thèse, voir [1.2.3](#).

⁴³ C'est-à-dire, le calcaire à rudistes ([5.2.2](#)), le calcaire lité ([5.2.3](#)), et le calcaire de Saint-Élie ([5.3.2](#)).

⁴⁴ Notion de qualité : voir l'introduction et le chapitre suivant.

⁴⁵ Voir plus loin, en [5.2.4](#).

⁴⁶ Voir le chapitre 2, sur les carrières antiques, pour la description des carrières. Perrier, A., Devolder, M., 2022. Les carrières de calcaire dites « du Stade » et « de Logari » à Delphes, in : BAEFAE, 3, 3, pp.1-21.

⁴⁷ Birot, P., 1959. Géomorphologie de la région de Delphes, in : BCH, 83, 1, pp.260.

⁴⁸ En calculant le nombre de joints par unité de volume, on peut estimer une taille des blocs : très grands (<1 joint / m³), grands blocs (1–3 joints / m³), blocs moyens (3-10 joints / m³), petits blocs (10-30 joints / m³), blocs très petits (>30 joints / m³) (d'après ISMR). Cependant, la difficulté d'accéder à l'affleurement (la falaise) et d'étudier les discontinuités complètement (sur toute la longueur, orientation) ne permet ici que d'émettre une estimation.

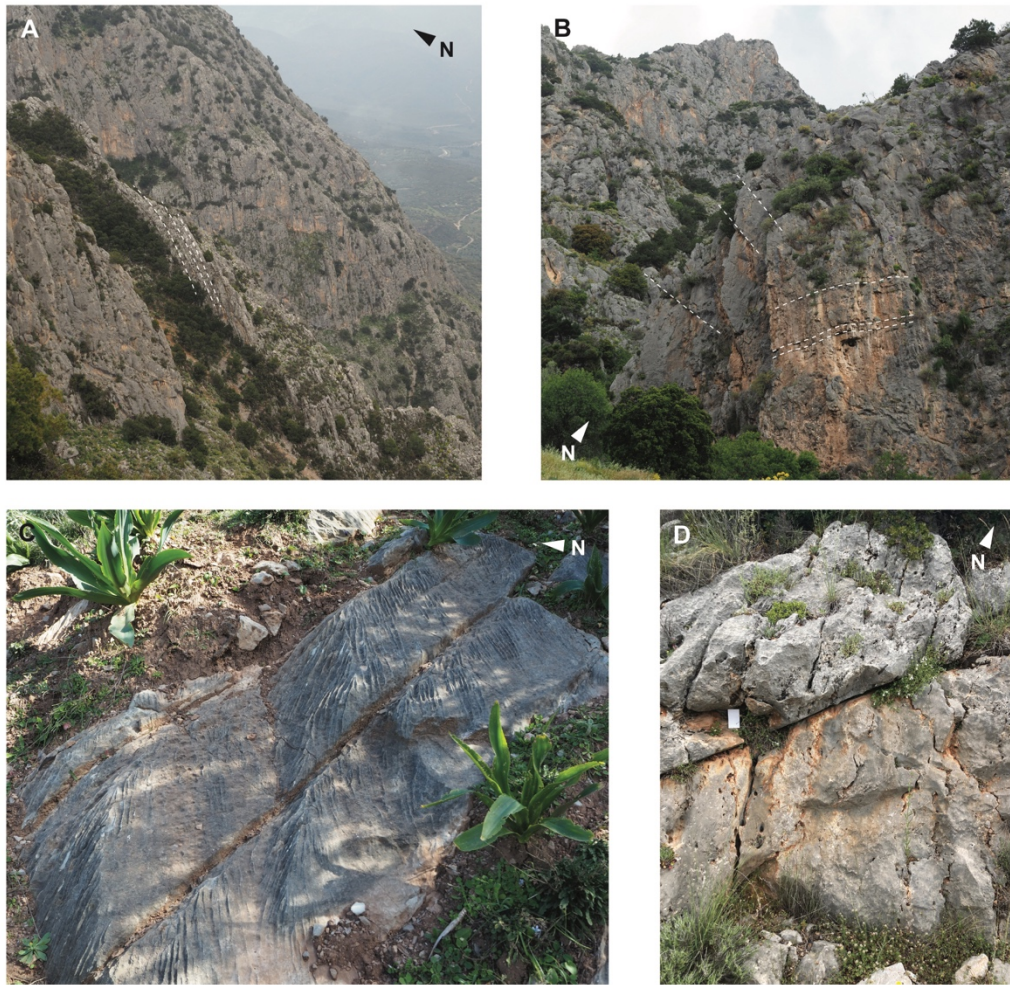


Figure 84. Les affleurements de calcaires du Parnasse dans la région de Delphes.

- A : vue depuis de haut des Phédriades surplombant le site de Delphes : stratification verticale.
 B : vue des Phédriades depuis le site : deux types de discontinuités sub-perpendiculaires. C : figures de dissolutions (lapiaz) et discontinuités (joint stratigraphique ou diaclase). D : discontinuités et réseau karstique.

La roche qui compose le massif présente un aspect homogène : grise, karstifiée, en bancs plus ou moins épais, datée du Jurassique ou Crétacé. Elle présente des variations de faciès légères (passées oolithiques par exemple), d'où l'appellation de « calcaires du Parnasse ». Au moins deux sous-faciès ont été définis en microscopie optique : un *packstone* composé majoritairement d'ooïdes et d'oncoïdes centimétriques dans une matrice sparitique (**Figure 85, A, B et D**), et un *wackestone* composé à 50% de grains, dans une matrice micro-sparitique (pellets, ooïdes, algues, équinodermes et d'autres restes biologiques non identifiés) (**Figure 85, C**).

Les analyses minéralogiques montrent une roche composée majoritairement de calcite, avec des traces de quartz détritique. Ces faciès présentent généralement une faible porosité, autour de 5%, liée aux karsts et à la fracturation de la roche. Avec une densité autour de 2,6 g/cm³ et un comportement mécanique cassant⁴⁹, ces calcaires possèdent une résistance moyenne⁵⁰.

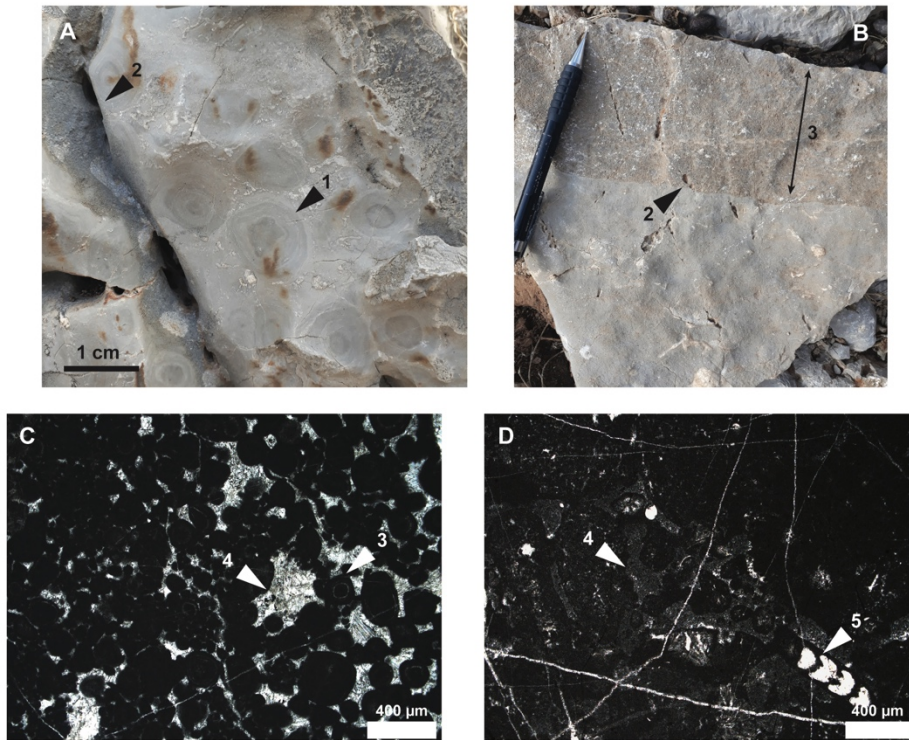


Figure 85. Les calcaires du Parnasse : description de la matrice rocheuse.
A et B : vues macroscopiques, avec oncoïdes (1), karst et micro-karst (2), et passées oolithiques (3). C et D : vues microscopiques, avec (4) la matrice micro-sparitique et (5) des restes biologiques.

Mis en œuvre, les calcaires du Parnasse apparaissent gris et se recouvrent d'une patine de même couleur, avec des traces de colonisation biologique (lichen). Il est courant de les voir fracturés et associés à une perte de matière, comme dans les murs nord des *parodoi* du théâtre (**Figure 86**, A). La qualité des blocs est variable, avec certains ne présentant que très peu de

⁴⁹ Après essais mécaniques en laboratoire sur 13 échantillons provenant d'un bloc de la falaise, les résultats obtenus montrent une résistance à la compression d'environ 40 MPa et à l'extension, d'environ 5 MPa.

⁵⁰ Les comportements des roches sont définis d'après l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (Aftès), qui publie en 2003 un livret de recommandations « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains ». Il sera cité ainsi : Aftès, 2003.

karst, leur donnant un aspect massif, comme dans les fondations du trésor de Siphnos (**Figure 86, B**), ou de nombreux micro-karst comme pour les gradins du Théâtre (**Figure 86, C**). Il ne faut pas les confondre avec la brèche de pente⁵¹ ou le calcaire lité, présenté ci-dessous.

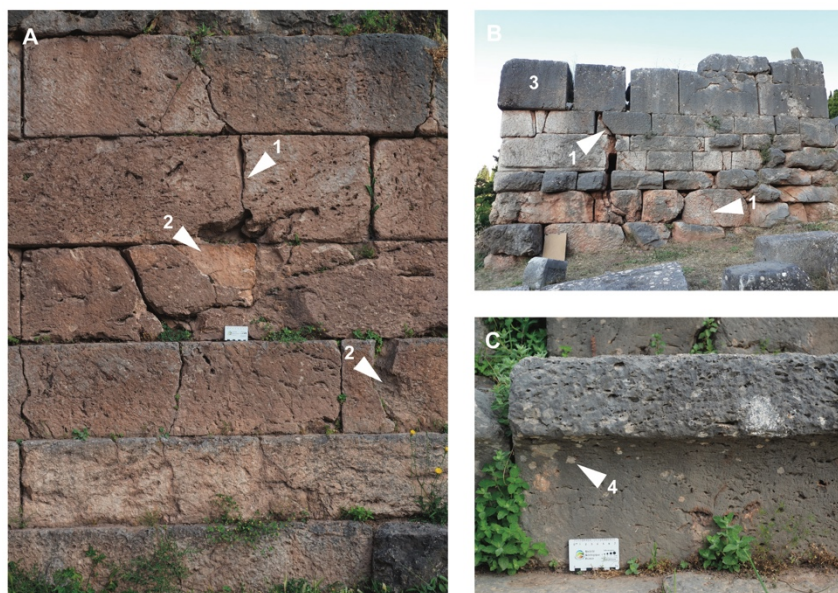


Figure 86. Les calcaires du Parnasse : mise en œuvre et altération.

A : mis en œuvre dans le parodoï est du théâtre (SD 612), avec une fracturation (1) pouvant engendrer une perte de matière (2). B : les fondations du trésor de Siphnos (SD 122), où des blocs sont fracturés (1) ; l'assise supérieure est composée de blocs particulièrement homogènes et denses. C : gradin du théâtre (SD 612) avec micro-karsts et lichens (4).

5.2.2 Le calcaire à rudistes

Le calcaire à rudistes tient son nom des fossiles qu'il contient : des rudistes, un groupe des bivalves marins vivant dans les milieux récifaux, à valves asymétriques. Ce calcaire s'observe à l'affleurement sur la colline de Philomélos, à l'ouest du site, et sous la route moderne, sous la brèche de pente qui le recouvre. Quelques traces d'extractions ont été observées, sur une surface assez réduite (inférieure à 200 mètres carrés). Il est très probable que la zone d'extraction ait été plus large, mais les aménagements liés à la Grande Fouille (tracés des trains d'évacuation des déblais), à la ville moderne de Delphes et la construction de la route, ont dû la faire disparaître ou la recouvrir. Il est cependant envisageable que l'ensemble du

⁵¹ Pour la description de la brèche de pente, voir ci-dessous, [5.2.4](#).

volume mis en œuvre à Delphes provienne de cette même zone : le volume de roche trouvé en place dans le site est très faible ⁵².

Les affleurements se présentent comme un massif rocheux très fracturé, avec des bancs d'environ 1,5 mètres maximum d'épaisseur, recoupés par de nombreuses diaclases et une légère karstification qui se développe dans les fractures. En effet, s'il possède un aspect massif et homogène à grande échelle, à cause de sa patine, il présente de nombreuses discontinuités : des micro-fractures, fractures et des stylolithes de type 4 (*wavy*), de très faible amplitude et fermés, qui sont difficilement distinguables (**Figure 87**, A et B). Les rudistes identifiés dans les affleurements appartiennent à la famille des Hippurites et des Radiolites⁵³, des bivalves en forme de cône, allongé, avec une valve réduite à un opercule. Ces espèces permettent de dater la roche du Crétacé supérieur (**Figure 87**, C).

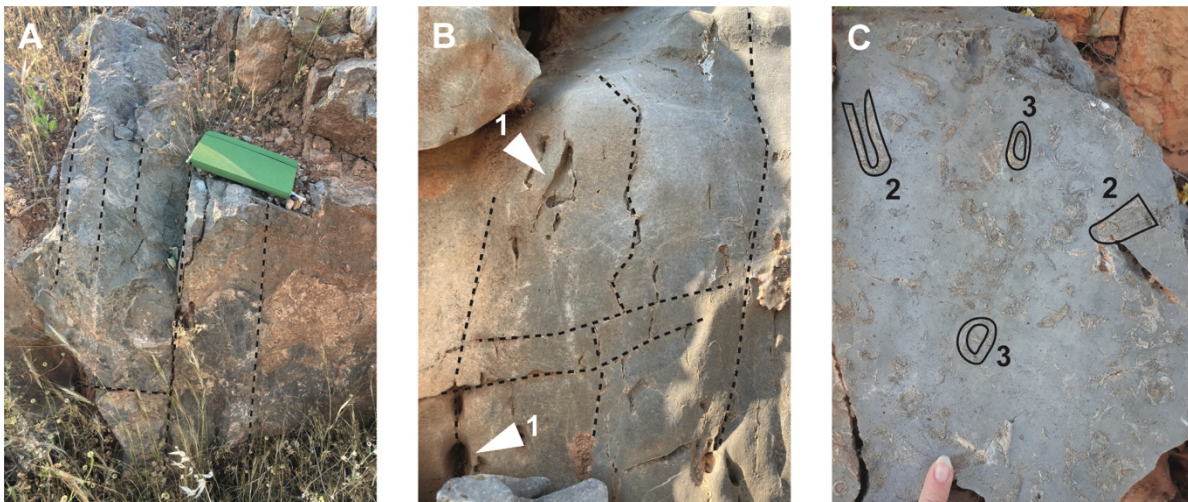


Figure 87. Les affleurements de calcaire à rudistes à Delphes.

A : affleurement sous le site, calcaire massif stratifié. B : micro-fracturation et karstification (1) dans les fissures. C : coupe longitudinale (2) ou transversale (3) de rudistes.

La roche extraite, au microscope optique, apparaît comme un calcaire de type *floatstone* très fracturé, avec une matrice micritique partiellement recristallisée en sparite. Quelques foraminifères multi-chambres de la famille des *Globigerinidae*, des foraminifères

⁵² Voir [5.6.1](#) : environ 200 m³ de calcaire à rudistes ont été mis en œuvre dans le site de Delphes.

⁵³ Le sub-groupe des Radiolites ont vécu de l'Albien au Maastrichtien, mais sont particulièrement abondants du Santonien au Maastrichtien ; celui des Hippurides ont vécu du Turonien au Maastrichtien (Flügel, 2004, p. 526).

planctoniques bisériaux et de la famille des Miliolidae peuvent être observés, avec les fragments de rudistes et les bioclastes non identifiés (algues, largement recristallisés) (**Figure 88**).

Avec une densité de $2,7 \text{ g/cm}^3$ et une porosité inférieure à 1%, le calcaire à rudistes possède un comportement cassant avec une fragilité structurelle⁵⁴.

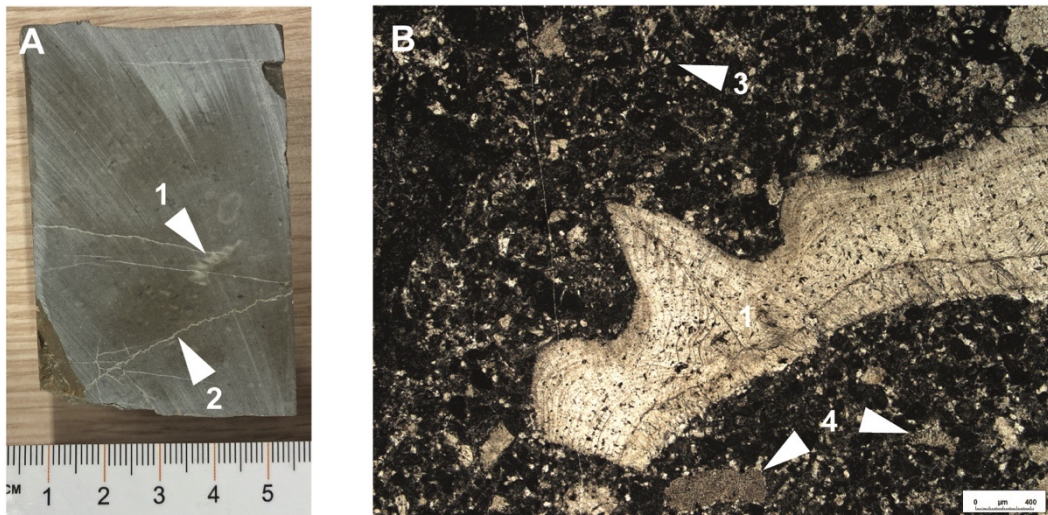


Figure 88. Le calcaire à rudistes : description de la matrice rocheuse.

A : roche sciée, avec les fragments de rudistes (1) et les stylolithes (2). B : vue microscopique, fragments de rudistes (1) dans une matrice sparitique avec foraminifères (3) et fragments biologiques (4).

Mis en œuvre dans le site, le calcaire à rudistes apparaît comme un calcaire massif, sombre, dans lequel les fossiles centimétriques entiers (sections transverses ou longitudinales) ou en morceaux peuvent être distingués. Il se recouvre d'un patine granuleuse noire et les fossiles sont mis en relief par érosion différentielle et perte de matrice (**Figure 89**, C et D). Parfois, des blocs se brisent selon les plans de diaclase, comme pour une des bases des Déinoménides (**Figure 89**).

⁵⁴ Aucune mesure en laboratoire n'a pu être réalisée sur ce faciès, mais la découpe d'un échantillon pour réaliser une lame mince a été compliquée : la roche explosait très facilement, à cause des fractures. Par extension, on peut estimer que l'extraction de gros blocs devait être aussi complexe.

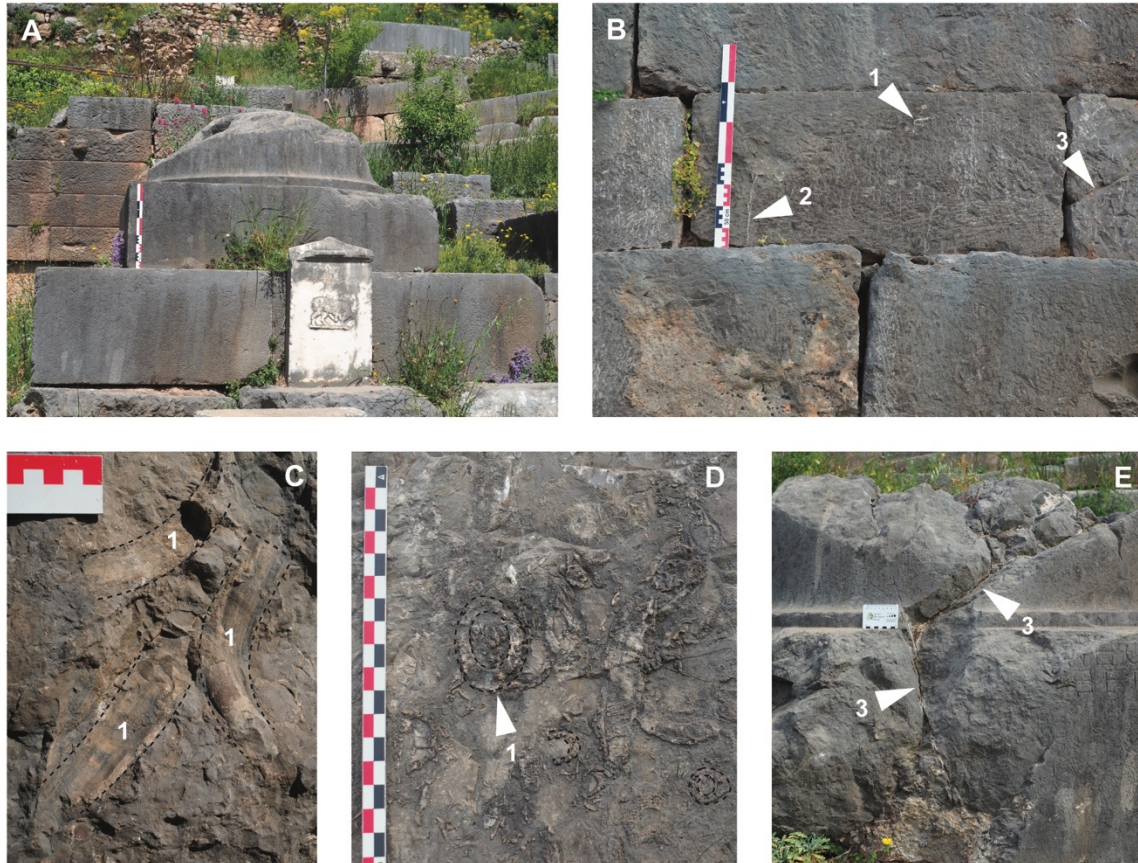


Figure 89. Le calcaire à rudistes : mise en œuvre et altération.

A : une des bases des Dénoméniades (SD 518), monolithique. B : les fondations du trésor SD 428, en calcaire à rudistes (1), avec des veines de calcite (2) et une légère fracturation (3). C : péribole sud, bloc cassé avec rudistes entiers (1). D : surface altérée avec les sections transverses de rudistes (1) en relief. E : l'autre base des Dénoméniades, qui s'est fracturée selon des plans rectilignes (diaclasses) (3).

5.2.3 Les calcaires lités

Les calcaires lités correspondent à un ensemble de roches présentant un litage : des lits de faible épaisseur, délimités par des discontinuités, plus ou moins parallèles entre eux. Ils proviennent de formations géologiques restreintes au Crétacé terminal, que l'on retrouve au pied de la faille de Delphes⁵⁵, et se caractérisent par un réseau de joints stylolithiques très resserrés et denses lui donnant cet aspect lité.

Il n'y a pas d'extraction antique attestée de ces faciès, mais des carrières modernes exploitent certaines de ces formations autour de Delphes : à 3 km vers l'est, un front de taille

⁵⁵ Voir le contexte géologique, en Chapitre 1 pour l'ouvrage, en [1.2.3](#) dans la thèse.

moderne où des blocs tombés de ce calcaire ont été identifiés, s'est potentiellement installé sur une carrière antique (**Figure 90, C**) ; à Arachova, à 12 km à l'est de Delphes, un calcaire rose foncé à gris (**Figure 90, B**). Le calcaire de Saint-Élie est un faciès particulier qui appartient à ces mêmes unités géologiques, mais il sera traité séparément⁵⁶. Au-dessus du site de Delphes, il n'y a pas de traces d'extraction assurées, ni d'affleurement : des blocs tombés ou non en place sont les derniers vestiges d'une ancienne exploitation potentielle⁵⁷.

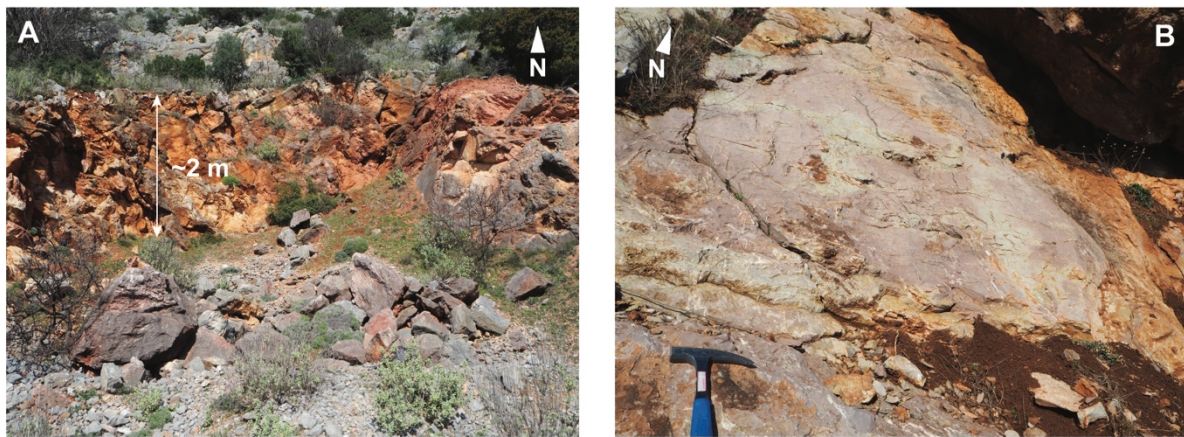


Figure 90. Les affleurements de calcaires lités dans la région de Delphes.

A : la carrière moderne à 3 km à l'ouest de Delphes. B : la carrière moderne d'Arachova, où est extrait un calcaire rose à gris type *wackestone* à joints stylolithiques.

Ils se caractérisent par un réseau de stylolithes dense (2 u./cm) : stylolithes fermés, parallèles, de type 3 ou 4 (*sutured* ou *wavy*) et de faible amplitude, mélangés avec des stylolithes ouverts de plus large amplitude. Si ce réseau est le plus caractéristique, on observe aussi des blocs présentant un réseau anastomosé : les stylolithes se recoupent tellement qu'il est difficile de les suivre. Les veines de calcite millimétriques à centimétriques (jusqu'à 2 centimètres) recoupent ou sont recoupées par les stylolithes avec un angle de 90° majoritairement (**Figure 91, A et B**).

Ces calcaires sont de type *wackestone*, avec 40% de grains (foraminifères planctoniques, multi-chambres, de forme conique et d'autres planispiralés) dans une matrice micritique (**Figure 91, C et D**). Les analyses minéralogiques montrent majoritairement de la

⁵⁶ Voir la partie suivante, en [5.3.2](#) : il a été transporté sur plusieurs kilomètres et a été exploité, il semblerait, à une période précise.

⁵⁷ Le pied de la falaise, où l'on devrait retrouver ses formations, est inaccessible suite à l'installation de barrières de protection dans les années 2000, pour protéger le site des chutes de pierres des Phédriades.

calcite (>95%) avec du quartz détritique et quelques minéraux argileux (mica, kaolinite). L'assemblage fossilifère permet de dater la roche du Maastrichtien⁵⁸. Comme la majorité des calcaires durs, ce faciès possède un comportement cassant⁵⁹, avec une porosité presque inexistante (<1%) pour une densité de 2,7 g/cm³.



Figure 91. Les calcaires lités : présentation de la matrice rocheuse.

A et B : calcaire massifs à joints stylolithiques ouverts (1) ou fermés (2), avec veines de calcite (3), couleur rose à grise. C et D : vues microscopiques.

Mis en œuvre, ces calcaires peuvent apparaître rouge, rose ou gris-blanc (**Figure 92**, A et B) mais ils se recouvrent d'une patine granuleuse lorsqu'ils sont exposés aux intempéries, plus ou moins foncée en fonction de la couleur initiale de la roche (**Figure 92**, A). Peu sensible à l'altération, on peut observer des dégâts mécaniques, des éclats, qui permettent de voir la vraie

⁵⁸ Le Maastrichtien est un étage stratigraphique du Crétacé, s'étalant d'environ 72 à 66 Ma.

⁵⁹ Les mesures en laboratoire donnent des résistances à la compression et l'extension de respectivement 56 MPa et 8 MPa (Aftès, 2003).

couleur de la roche (**Figure 92, D**), et des modifications de couleur des résidus dans les stylolithes. Peu de fracturation a été observée.



Figure 92. Les calcaires lités : mises en œuvre et altération.

A : parement interne du péribole est (SD XX), au-dessus de la fondation SD 302, qui présente la variabilité des calcaires lités ; rose clair et massif (1), rouge et très fracturé (2), gris (3). B : mur de soutènement, au nord de la fondation SD 228, montrant un bloc de calcaire massif gris (3), avec des joints stylolithiques de faible amplitude et fermés (4).

Il ne faut pas les confondre avec le calcaire de Saint-Élie : les deux critères diagnostiques sont la couleur et le réseau de stylolithes dense et anastomosé. Particulièrement quand le faciès prend une couleur grise, il faut alors identifier les stylolithes et leurs formes.

5.2.4 La brèche de pente

Un conglomérat est employé à Delphes : c'est la brèche de pente locale⁶⁰. C'est un faciès à l'aspect visuel et aux propriétés variables, issu de l'altération du massif du Parnasse (éboulis re-cimentés avec une matrice argileuse). Comme les calcaires du Parnasse, on peut considérer ce faciès comme celui « par défaut », directement accessible et peu coûteux : le site de Delphes est construit en partie sur cette formation.

Les affleurements se présentent comme des bancs d'épaisseur variable, jusqu'à pluri-métrique, avec une stratification globale dans le sens de la pente. En particulier, plusieurs générations semblent se recouvrir et se recouper, plus ou moins consolidées (**Figure 93**).

⁶⁰ Voir le Chapitre 1, « Contexte géologique », dans le livre, et [1.2.3](#) dans la thèse.



Figure 93. Les affleurements de brèches de pente dans la région de Delphes.
 A : versant est du promontoire de Philomélos, au-dessus de Delphes, où la brèche repose en discordance sur le flysch. B : sous la carrière du Stade, au nord du site de Delphes : rampe en brèche. C : au nord de la ville de Delphes, brèches récentes peu consolidées.

C'est une brèche monogénique, composée de clastes anguleux de calcaires du Parnasse liés par une matrice argileuse. Les deux sous-faciès du Parnasse identifiés ont été observés dans les clastes : calcaires à oôides, et calcaires type *wackstone* (**Figure 94**). Les clastes sont de tailles variées, millimétriques à pluri-centimétriques, sans classement, et la proportion et la couleur de la matrice sont variables.

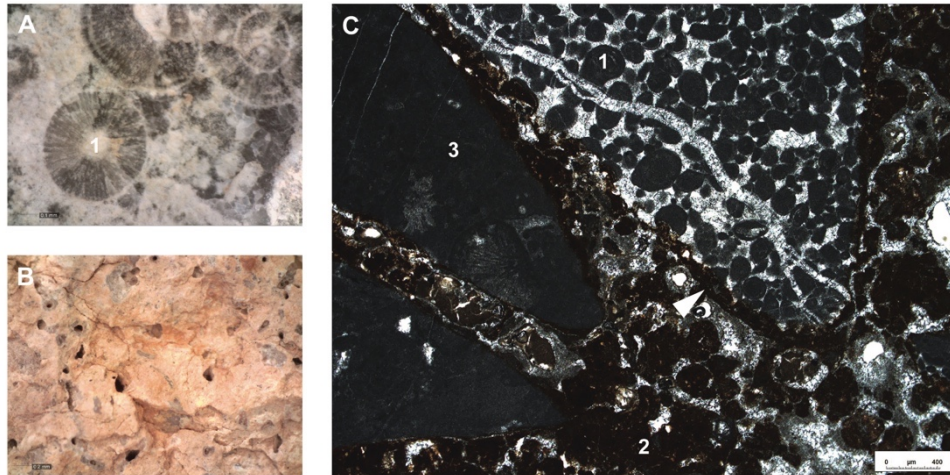


Figure 94. La brèche de pente : description microscopique.

A et B : vues au Dino-Lite d'un bloc de brèche mis en œuvre dans le Portique Ouest, zooms sur un claste de calcaire à ooïdes (1) et sur la matrice. C : vue microscopique de la brèche : claste de calcaire à ooïdes (1) et de calcaire type *packstone* (2), dans une matrice argileuse.

Mis en œuvre, la brèche de pente s'altère facilement et/ou se fissure (**Figure 95, A**). A cause de la matrice argileuse et de l'action des agents atmosphériques (pluie, vent, neige), on observe régulièrement des dégradations physiques : une érosion différentielle avec perte de la matrice et mise en relief des clastes de calcaire, parfois jusqu'à perte du claste (**Figure 95, C et D**). Les blocs se recouvrent d'une couche orange, issue de la matrice, comme sur le mur du fond du Portique Ouest (**Figure 95, A**).

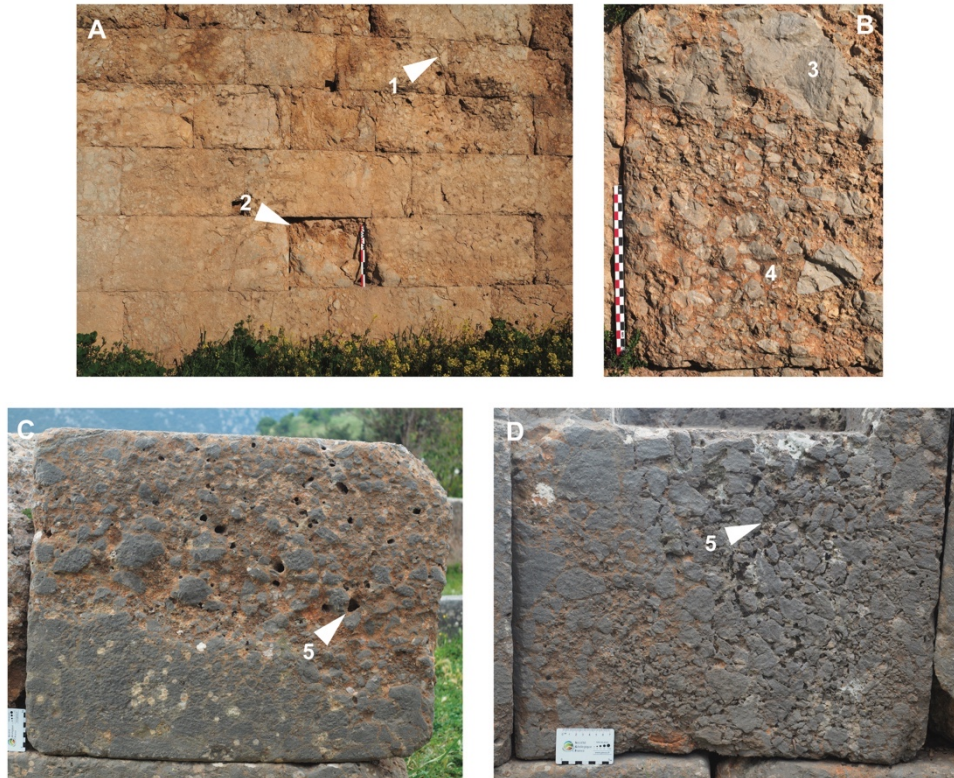


Figure 95. La brèche de pente : mise en œuvre et altération.

A : le mur de fond du Portique Ouest (SD 437) où la brèche se fracture (1) et s'altère jusqu'à perte de matière (2). B : le mur de fond du Portique en conglomérat (SD 108), avec des clastes pluri-centimétriques de calcaire de type *wackestone* (3) et à oïdes (4). C et D : blocs mis en œuvre montrant une érosion différentielle (5) de la matrice, et les variations de classement dans la brèche.

5.2.5 Le flysch jaune

Sous le terme de flysch jaune ont été regroupés les faciès extraits du flysch éocène⁶¹ sur lequel le site est construit. Il se présente sous la forme d'une alternance de grès arénites en bancs centimétriques à déca-centimétriques (**Figure 96, A**), avec des unités plus détritiques meubles et fines (silts argileux, bioturbés). L'épaisseur du flysch ne peut pas être déterminée avec certitude : il affleure dans toute la région, est très déformé et montre des variations de faciès importantes (bancs de grès très fins, et unités détritiques plus importantes).

Il a été observé dans le monument SD 402 et dans le Pseudo-Bouleutérion (SD 221), uniquement employé dans les fondations, non visibles (**Figure 96, B, C et D**). Cependant, ce

⁶¹ Voir le contexte géologique, Chapitre 1 pour le livre, en [1.2.3](#) pour la thèse.

ne sont pas les bancs indurés qui semblent avoir été employés (**Figure 96**, E et F) mais les unités plus fines et meubles. Les blocs présentent un très grand degré de dégradation : s'il ne se recouvre pas d'une patine orange (**Figure 96**, C), on observe généralement une perte de matière, un délitage selon la stratification, avec un changement de texture superficielle. Il est donc probable que les vestiges employant ce faciès aient aujourd'hui totalement disparu.

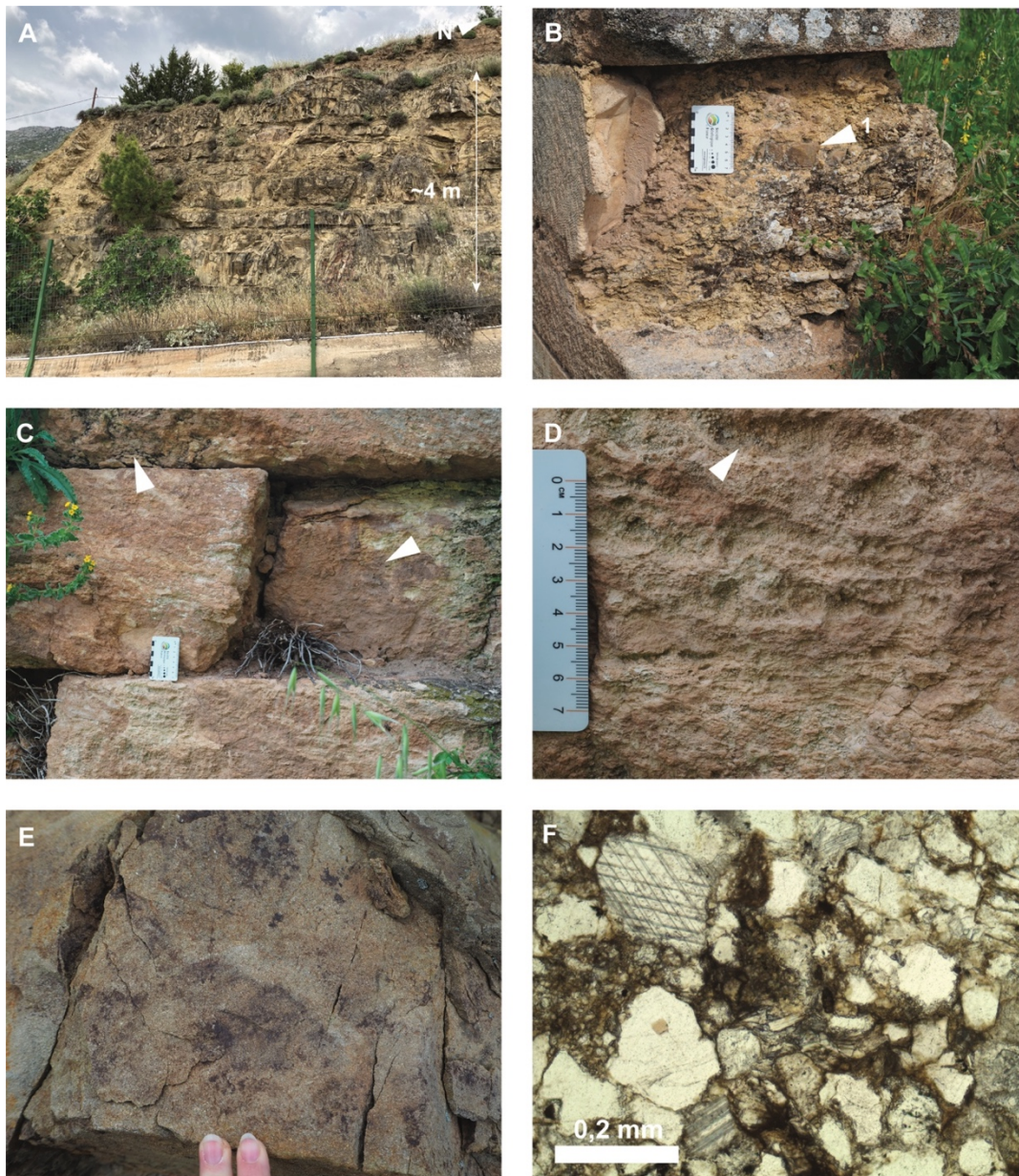


Figure 96. Le flysch jaune : affleurement, mise en œuvre et description.

A : affleurement au nord de la ville moderne de Delphes : blancs pluricentimétriques de grès arénites. B : bloc mis en œuvre dans le pseudo-bouleutérion (SD 221) montrant un reste d'unité gréseuse (1). C et D : blocs mis en œuvre dans les fondations de SD 402 : faciès détritique fin, recouvert d'une patine orange, il se délitage. E et F : grès à l'affleurement et vue microscopique.

5.3 Les matériaux régionaux à Delphes

5.3.1 Le travertin de la vallée du Pléistos

Un travertin provient de carrières antiques identifiées en 2021⁶² au fond de la vallée du Pléistos, en contre-bas de Delphes, à environ 2 kilomètres. Il a été employé pour les fondations du trésor de Thèbes (SD 124), le xyste du Gymnase (SD 52), et à Marmaria uniquement, pour le Temple en tuf (SD 29). Il est aussi utilisé pour la construction de l'Hérôon de Blum, un monument funéraire de l'époque impériale.

Il s'agit d'un tuf d'eau froide, par opposition aux tufs hydrothermaux formés en eau chaude, formé à la sortie d'une source d'eau venant du Parnasse. L'affleurement n'est pas contraint mais s'étale sur 40 mètres au minimum. Il présente une fabrique typique des concrétions calcaires autochtones (sur place) : une forte macro-porosité (cavités) liée à la dissolution d'éléments biologiques (racines, feuilles) (**Figure 97**, A et B). En lame mince, on observe une matrice micritique à peloïdes et un remplissage des cavités par une sparite drustique secondaire.

Il n'a pas toujours été stuqué lors de son emploi. Une particularité s'observe dans les fondations du trésor de Thèbes (**Figure 97**, D) : un tesson de céramique est pris dans la structure de la roche. Cela permet de dater la roche, au plus tard, du début de la production de céramique dans la région.

⁶² Voir Chapitre 2, sur les carrières antiques, dans le livre, et dans la thèse : [Q5](#).



Figure 97. Le travertin du Pléistoc : affleurement et mise en œuvre.

A et B : front de taille de la carrière, présentant une macro-porosité (cavités) liée à la bioconstruction. C : travertin mis en œuvre dans le temple en tuf (SD 39) à Marmaria. D : travertin mis en œuvre dans les fondations du trésor de Thèbes (SD 124), avec un tesson pris dans la matrice.

5.3.2 Le calcaire de Saint-Élie

Le calcaire extrait des carrières de Saint-Élie⁶³, à environ 6 kilomètres à l'ouest de Delphes, porte son nom et est employé dans les sanctuaires d'Apollon et d'Athéna Pronaia, en particulier pour le temple d'Apollon du IV^e siècle avant JC.

Le massif rocheux est une unité du Crétacé supérieur, qui semble de faible étendue. Il est homogène mais traversé par de nombreuses discontinuités : diaclases et joints stylolithiques. Cependant, des blocs de grandes dimensions peuvent être extraits, jusqu'à 2 mètres de long (**Figure 98**).

⁶³ Voir Chapitre 2, sur les carrières antiques, dans le livre, et dans la thèse : [Q6](#).

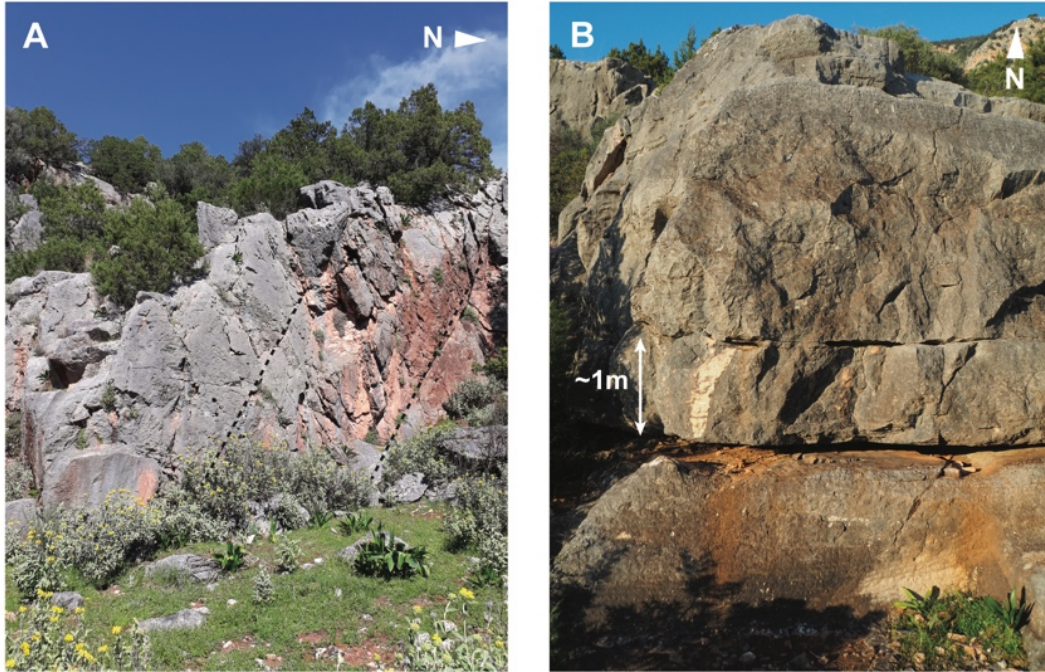


Figure 98. Les affleurements de calcaire de Saint-Élie.

A : front de taille à l'ouest de la carrière, où l'on peut voir les fractures dans le massif rocheux. B : front de taille avec les discontinuités horizontales.

Il se présente avec des veines de calcite blanche, rectilignes et millimétriques, recoupant les nombreux stylolithes, irréguliers, simples et de faible amplitude (1,3 u./cm) (**Figure 99, A**). Quelques nodules de silex centimétriques ont été observés, mais ce faciès reste extrêmement homogène.

En lame mince, c'est un *mudstone* qui présente un assemblage fossilifère important et diversifié (15 à 20% des grains) dans une matrice micritique. Les calcisphères et foraminifères pélagiques sont majoritaires : l'espèce *Globotruncana arca* (Cushman, 1926) avec un test biconvexe trochospiralé bas, hyalin et perforé, entre 6 et 9 loges bien délimitées, à deux carènes (**Figure 99, B**), est attribuée au Maastrichtien. Quelques fragments de coquilles de bivalves, des foraminifères de forme conique et d'autres planispiralés (section transverse) sont visibles, de petite taille (< 0,4 mm). Les tests sont entiers et bien conservés, l'environnement de dépôt est pélagique et benthique. La porosité est très faible et localisée dans les joints stylolithiques, qui sont parfois ouverts. Les analyses montrent une composition calcitique. Avec une densité

d'environ 2,65 g/cm³ et une porosité inférieure à 1%, c'est un faciès extrêmement dense avec un comportement cassant et près peu perméable⁶⁴.

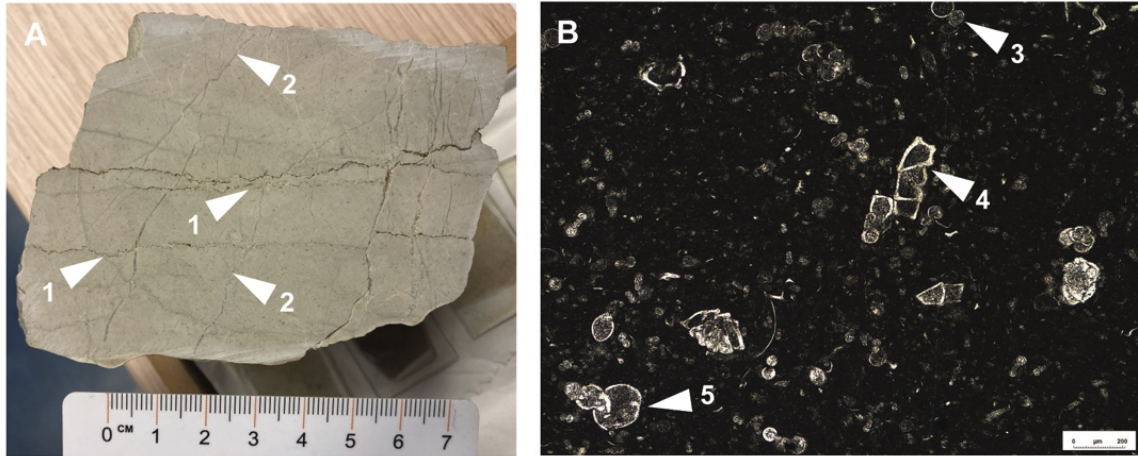


Figure 99. Le calcaire de Saint Elie : la matrice rocheuse.

A : échantillon scié, avec les joints stylolithiques (1) et les veines de calcite visibles (2). B : vue microscopique, avec les forminifères *Globotruncana arca* (4), des planispiralés (5) et des calcisphères (3).

Mis en œuvre, il apparaît gris clair, presque blanc, mais se recouvre d'une patine superficielle, sombre et granuleuse. Peu sensible à l'altération cependant, on peut observer des dégâts mécaniques, des éclats, qui permet de voir la vraie couleur de la roche (**Figure 100**). Les blocs sont majoritairement employés avec les joints stylolithiques à l'horizontal, sinon ils se fracturent.

Il ne doit pas être confondu avec le calcaire rose, présenté au-dessus : ce sont des roches de même âge et de même type, qui se sont donc formées dans des environnements similaires. Mais elles sont distantes de quelques kilomètres.

⁶⁴ Aftès, 2003. Il possède une résistance à l'écrasement et à l'extension respectivement de 58 et 13 MPa. Voir [4.3.3](#) dans la thèse.



Figure 100. Le calcaire de Saint Elie : mise en œuvre et altération.

A : dans le temple, on observe des cassures (1) au niveau des angles et des arêtes. B : bloc hors contexte, où l'on voit des joints stylolithiques (2) et les veines de calcite (3) et la différence de patine entre la partie qui était sous terre, et celle à l'air libre. B : éclat révélant la couleur gris clair de la roche. B : dalle dans le portique en conglomérat (SD 108), où les joints stylolithiques peuvent être plus marqués à cause de l'érosion, et le développement de lichen.

5.3.3 Le marbre noir de Livadia

Un marbre noir, grossier, avec des inclusions blanches (**Figure 101**), a été employé pour la nouvelle colonnade du xyste au Gymnase, celles de l’Agora romaine et de la Maison à péristyle. La concordance avec le marbre extrait des carrières de Livadia, environ 50 km à l’est de Delphes, a été vérifiée par Y. Maniatis et M. Déroche en 1989⁶⁵. Des traces antiques d’extraction y avaient été observées, mais elles ont aujourd’hui disparu ou n’ont pas été retrouvées : mais des carrières modernes aujourd’hui exploitent un faciès similaire.

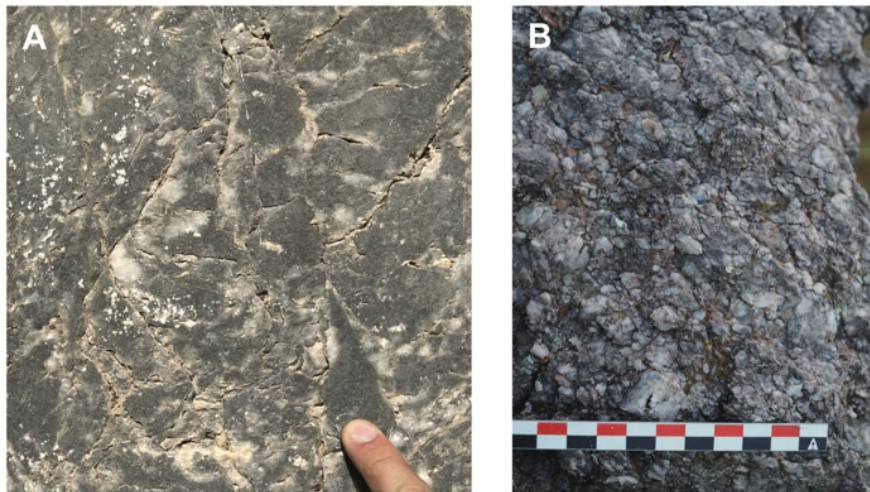


Figure 101. Le marbre de Livadia mis en œuvre.

A : colonne de l’agora romaine, surface polie, avec les inclusions blanches caractéristiques. B : une base en marbre dans le xyste du gymnase, très altérée.

5.4 Les matériaux allochtones

5.4.1 Les marbres blancs des îles et de l’Attique

D’après la littérature, les marbres blancs employés à Delphes proviennent des Cyclades et de l’Attique majoritairement : de Paros, Naxos, Siphnos, et du Pentélique⁶⁶. Ils ont été employés pour la sculpture mais aussi dans le bâti.

⁶⁵ Déroche et al., 1989, p.404.

⁶⁶ Voir l’introduction sur les études antérieures ([5.1.3](#)), pour les références.

5.4.2 La dune oolithique de Corinthe

Un des faciès les plus employés dans la construction est la dune oolithique⁶⁷, extraite dans la région de Corinthe. Sa provenance est assurée par des textes anciens⁶⁸ et l'étude des carrières de la région corinthienne : ce faciès particulier ne se trouve actuellement qu'à Corinthe même, et à Examilia, où une carrière de presque 3 km de long a été exploitée pendant toute l'Antiquité⁶⁹.

Cette roche est un *grainstone* très faiblement cimenté par une sparite équigrulaire. Les grains sont presque exclusivement des ooïdes avec quelques rares lithoclastes ou bioclastes (**Figure 102, C**). On observe une stratification plane ou oblique, indiquant un environnement de dépôt côtier, de haute énergie et peu profond, où ont pu se former les ooïdes qui ont sédimenté et se sont consolidées lors de la diagenèse (**Figure 102, B**).

La roche est très bien triée : les grains ont des tailles similaires, inférieures à 0,2 mm. Ce sont des ooïdes concentriques superficielles (l'épaisseur du cortex est inférieure à la moitié du diamètre du nucléus), mais qui a souvent subi une micritisation du cortex effaçant les lamines. La roche présente une porosité primaire intergranulaire et secondaire moldique (**Figure 102, D**).

C'est une roche calcaire, composée majoritairement de calcite, mais de l'aragonite, du quartz, de l'albite et de l'andalousite ont aussi été identifiés. Ces minéraux secondaires se trouvent généralement dans les nucléus : ce sont des minéraux détritiques, qui proviennent des formations alentour, qui ont été érodés et repris lors de la formation de la dune de sable.

La dune oolithique montre des variations de faciès, cependant assez restreintes. S'il apparaît parfois plus ou moins clair, fin, ou pur, cela reste la même roche extraite de la région de Corinthe. En particulier, la présence de clastes allochtones est assez récurrente : des galets de calcaires ou de radiolarites, arrondis, ainsi que des débris biologiques (coquilles, algues). En particulier, les chapiteaux en galette que l'on associe au temple en tuf à Marmaria sont dans ce

⁶⁷ Son nom provient de ses conditions de dépôt : c'est une dune de sable, composée d'ooïdes.

⁶⁸ Bousquet, J., 1988. Études sur les comptes de Delphes, Bibliothèque des Écoles Françaises d'Athènes et de Rome, De Boccard, pp.232.

⁶⁹ Hayward, Chris L., 1996. High-resolution provenance determination of construction-stone: A preliminary study of Corinthian oolitic limestone quarries at Examilia, *Geoarchaeology* 11, 3, pp. 215-234. Hayward, Chris L., 2003. *Geology of Corinth: The Study of a Basic Resource*, *Corinth* 20, p. 15-42. Dans la thèse, voir [Q16](#) et en [4.3.3](#).

sous-faciès (**Figure 102, A**). Cependant, rien ne semble indiquer une provenance différente des autres sous-faciès de dunes oolithiques, si ce n'est un endroit différent de la carrière⁷⁰.

Ce faciès présente une forte porosité (de l'ordre de 40%) et de fait une densité assez faible, entre 1,4 et 1,7 g/cm³. Sa résistance mécanique est faible⁷¹ : on peut définir la dune oolithique comme une roche homogène, légère et tendre, et donc facile à extraire, tailler, transporter et sculpter.

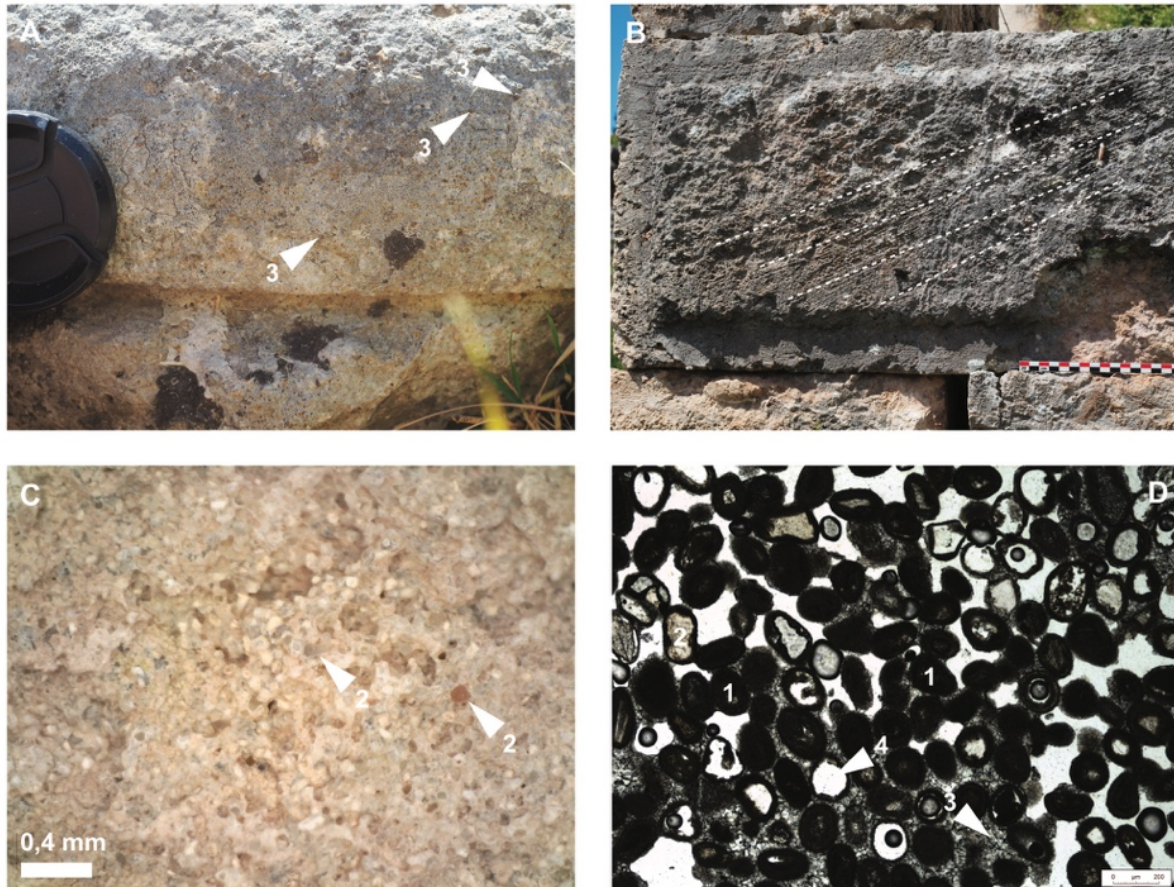


Figure 102. La dune oolithique : description macroscopique et microscopique.

A : chapiteau en galette à Marmaria : inclusions de galets plus grossier (3). B : bloc mis en œuvre dans les fondations SD 337, montrant une stratification plane. C : photo au microscope portable de la texture de la roche, composée d'ooïdes avec quelques lithoclastes (2). D : vue microscopique de la dune d'Examilia, composée d'ooïdes (1), avec quelques minéraux (2) dans une matrice peu cimentée (3), à l'origine de la porosité interparticulaire.

⁷⁰ La carrière d'Examilia faisant presque 3 kilomètres ; voir la thèse de Ch. Hayward, 1994, qui définit 5 lithotypes différents.

⁷¹ Aftès, 2003. Le faciès présente une résistance de 2,8 MPa en compression, et 2 Mpa en l'extension. Voir [4.3.3](#) dans la thèse.

Mis en œuvre, elle se reconnaît à sa texture à grains très serrés et sa couleur blanche à jaune quand elle n'est pas altérée. Cependant, quand elle est exposée aux intempéries, elle peut se recouvrir d'un encroutement gris ou orangé, homogène, avec des lichens et d'autres biologes qui masquent intégralement sa texture (**Figure 103, A**). Elle était très souvent stucquée car sa résistance à l'altération est faible, avec généralement de la perte de matière : éclatement, fracturation, figures d'érosion et de désagrégation, d'alvéolisation (**Figure 103, C et D**).



Figure 103. La dune oolithique : mise en œuvre et altération.

A : bloc de la fondation SD 306, où l'altération grise et les encroûtements biologiques (1) font disparaître la texture de la roche. B : blocs remployés dans les fondations du temple d'Apollon du IV^e siècle (SD 422), protégés (2) ou non (1) de la pluie. C : arrière du mur ouest de l'escalier du théâtre, où la zone non protégée (2) présente des fractures (4). L'altération s'associe régulièrement avec de la perte de matière (3). D : fût de colonne en place dans le portique d'Attale, qui a « fondu » et a perdu de la matière (3).

5.4.3 Le calcaire coquillier de Mégare

Ce calcaire tendre est reconnaissable par son riche contenu fossilifère : il n'a été retrouvé en place que dans un monument, la fondation SD 216, à l'arrière du bastion du Mégarien (SD 217). Ce calcaire coquillier proviendrait de la région de Mégare⁷² : la carrière antique n'a pas pu être localisée de façon précise, mais devrait correspondre aux formations pliocènes du bassin de Mégare⁷³.

⁷² Nenna et Laroche, 1993, et dans la thèse [Q12](#).

⁷³ Theodoropoulos, D., 1968. Stratigraphie und Tektonik des Isthmus von Megara (Griechenland).

On trouve différentes espèces de bivalves, généralement des empreintes (80%), mais la coquille est parfois conservée. Les fossiles ne sont pas fracturés, les valves sont souvent attachées entre elles, ce qui indique un environnement de dépôt calme. L'espèce caractéristique est un bivalve de la famille des Cardiidae (Lamarck 1809) : valves équivalentes et inéquilatérales, de forme ovale, à côtes radiales et commissure crénelée, et de taille centimétrique (3-4 cm en moyenne) (**Figure 104, A**). D'autres espèces sont présentes : de forme ovale, voire elliptique, à stries concentriques, de taille plus petite (<1cm). Les fossiles se trouvent dans une matrice plus fine, à peloïdes (**Figure 104, C**).

Ce calcaire apparaît mis en œuvre de couleur jaune-orangée, hétérogène par la présence des fossiles (trous ou aspérités lorsque les coquilles ont disparu). Il se recouvre avec le temps d'un léger encroûtement gris, d'encroûtement biologique (mousse) mais des pertes de matière et des éclats sont visibles (aux angles) (**Figure 104, B**).

Il n'y a pas assez de volume représenté à Delphes pour déterminer si ce faciès présente de grandes variations⁷⁴. Cependant, c'est le seul qui présente des fossiles centimétriques visibles à l'œil nu, ce qui le rend très facilement identifiable.

⁷⁴ Un volume inférieur à 50 m³ a été retrouvé en dans le sanctuaire, en place et blocs errants compris. Voir [5.6.1](#).



Figure 104. Le calcaire de Mégare : mise en œuvre et description macroscopique.

A et B : bloc mis en œuvre dans la fondation SD 217, avec les empreintes de bivalves visibles (1), des coquilles parfois conservées (2). Il se recouvre de mousse (4) et on observe de la perte de matière aux arêtes (3). C : vue au microscope portable, avec la matrice péloïdale visible (5).

5.4.4 Les pierres calcaires noires

Des pierres caractérisées par leur couleur noire ont été employées dans le site, dans des proportions assez faibles et, il semblerait, pour des effets de polychromie⁷⁵. Elles sont parfois

⁷⁵ Martin, R., 1987. Le marbre dans l'architecture grecque, in: Architecture et urbanisme. Rome : École Française de Rome, p.394-395 : « Dans cette tradition se situe une recherche toute particulière de la polychromie naturelle demandée aux marbres de couleur, aux oppositions de calcaires sombres, dans les tons bleus ou très foncés. »

nommées « marbre noir »⁷⁶ ou « marbre bleu »⁷⁷, d'autre fois « calcaire bleu-noir »⁷⁸, ce qui illustre très bien le problème de définition de ce faciès.

Si la couleur peut être subjective – ces pierres sont *sombres* dans tous les cas – d'un point de vue pétrographique, ce sont uniquement des roches sédimentaires, des calcaires très fins, parfois cristallins, avec une très faible porosité. Ils possèdent en général la capacité à être polis, ce qui prête à la confusion avec le marbre. Ces roches ne sont pas utilisées pour la pierre de taille, mais pour des assises supérieures de bases, des plaquages et rarement dans le bâti. L'origine précise de ces pierres n'a pas pu être définie sans analyses plus poussées, mais des hypothèses peuvent être émises : une origine allochtone des différents calcaires noirs, sur des arguments géologiques et historiques.

Premièrement, le faible volume mis en œuvre⁷⁹ et dans des monuments dédiés par des cités étrangères penchent en faveur d'une provenance étrangère. Ils sont employés en particulier pour le plaquage de l'autel de Chios (SD 417) et pour le sol dans la Tholos à Marmaria (SD 40) ; pour l'assise supérieure de la base des Arcadiens (SD 105), la base des Béotiens (SD 326), la base inachevée dans l'enclos de Néoptolème (SD 507). Des blocs errants ont aussi été observés : des bases, des métopes (**Figure 105**).

Deuxièmement, des carrières de calcaires noirs sont connues et plusieurs hypothèses de provenance avaient déjà été émises par les archéologues : Argos, Éleusis⁸⁰, ou Chios⁸¹. Les carrières d'Argos ont été repérées récemment et ont produit des pierres noires : un calcaire

⁷⁶ Homolle, 1897, p.573 indique que du « marbre noir » est employé pour l'assise supérieure de la base des Arcadiens.

⁷⁷ Bourguet, E., 1914. Les ruines de Delphes, (ed.) Fontemoing et Cie, en décrivant l'autel de Chios, p. 177 : « Les plaques de marbre noir qui formaient le revêtement ». Au contraire, dans le Guide de 2016, sur l'Autel de Chios : « Parois verticales en marbre bleu ». Replat, J., 1920. Note sur la restauration partielle de l'autel de Chios à Delphes, in : BCH 44, 1, p. 330 ne s'avance pas sur la nature de la roche et parle uniquement d'une « pierre d'un bleu sombre ».

⁷⁸ Bourguet, p. 280, « un autre pilier triangulaire, fait de calcaire bleu-noir sur socle gris »

⁷⁹ Un volume d'environ 40 m³ de pierre noire a été estimé, toutes roches confondues.

⁸⁰ Charbonneau, J., 1925. Le sanctuaire d'Athéna Pronaia. La Tholos. Fouilles de Delphes, topographie et architecture, fascicule 1 (texte), p. 10 « La troisième assise [...] est faite de blocs calcaires bleus sombre d'Éleusis. ». Il indique aussi que la même roche aurait été utilisée dans la stoa des Athéniens et l'autel de Chios.

⁸¹ Stikas, E., La restauration de l'autel d'Apollon à Delphes, in : BCH, 1979, p. 481, note 6 : [...] Il est probable que les Chiotés ont amené ces pierres de leur patrie, car elles ont exactement la même couleur que le marbre noir bien connu de Chios ».

éocène à nummulites⁸². Les carrières d'Éleusis n'ont jamais été identifiées clairement, mais il semblerait que la roche soit un calcaire biomicritique de Sénonien-Turonien⁸³. Enfin, des affleurements de calcaires noirs sur l'île de Chios ont aussi été identifiés : un calcaire de type *wackestone*, composé de peloides et quelques bioclastes, du Jurassique inférieur⁸⁴. On peut rajouter à ces hypothèses la région de Thèbes⁸⁵ (Tanagra) et, potentiellement, le Cap Ténare⁸⁶. A Tanagra, c'est un calcaire de type *mudstone*, finement veiné, datée du Trias, qui a été exploité.

Ces calcaires se ressemblent, mais présentent cependant des variations de texture et de couleur légères, qui sont difficilement distinguables puisqu'il n'existe que très peu de blocs : il n'y a que très peu de cassure fraîche, et donc à la texture de la roche même. Le faciès employé à l'autel de Chios (SD 417) présente des joints stylolithiques, que l'on n'observe pas sur les autres (**Figure 105**, B). Dans la Tholos (SD 40), la roche présente en effet une couleur plus bleutée, mais surtout un litage et un grain plus grossier (**Figure 105**, D). Pour les bases des Arcadiens (SD 105) et des Béotiens (SD 211), le calcaire employé montre des fracturations et des veines de calcites (**Figure 105**, F et G), que l'on retrouve aussi dans des blocs errants (**Figure 105**, I). Enfin, une roche qui présente un polissage particulier, dans lequel des fossiles ont été identifiés, est employée dans la base de Néoptolème (SD 507) et pour une métope errante (**Figure 105**, E et H).

Cependant, sans analyse plus poussée, il n'est pas possible de différencier les roches et de prouver une provenance, sur des critères macroscopiques uniquement : la variabilité des roches extraites dans les carrières, l'altération des blocs errants, doivent être estimées.

Cependant, les calcaires noirs ne doivent pas être confondus avec le calcaire à rudistes⁸⁷, qui est aussi de couleur sombre. La présence de fossiles de rudistes chez l'un, une capacité à être poli chez l'autre, permettent de les différencier.

⁸² Voir [Q23](#) dans la thèse.

⁸³ Dermitzakis, M., Tziligaki, E. Stamatakis, M., Ypsilanto., E, Pomoni-Papaioannou, F., 2006. "The bluish black Eleusinian stone; origin, technical features and archaeological data, in : Ορυκτός Πλούτος / Mineral Wealth, 139, pp. 21-33.

⁸⁴ Brilli, F., Antonelli, F., Giustini, F., Lazzarini, L., Pensabene, P., 2010. Black limestones used in antiquity: the petrographic, isotopic and EPR database for provenance determination, in: Journal of Archaeological Science, pp. 994-1005.

⁸⁵ Voir [Q10](#) dans la thèse.

⁸⁶ Cependant, ce dernier est un marbre d'après la littérature : voir Le Tallec, 2014, p. 157. Elles sont aussi assez loin, alors que des carrières de pierres noires existent plus près de Delphes.

⁸⁷ Voir en [5.2.3](#).



Figure 105. Les pierres noires : mises en œuvre.

A et B : l'autel de Chios et zoom sur le plaquage en calcaire noir. C et : la Tholos de Marmaria (SD 40), avec un sol indiqué en rouge, en calcaire noir. E : la base de Néoptolème (SD 507), zoom sur l'assise supérieure. F : la base des Arcadiens (SD 105), assise supérieure. G : la base des Béotiens (SD 211), assise supérieure. H et I : blocs isolés, en calcaire noir.

5.5 Les matériaux d'origine inconnue

Le grès bioclastique (Figure 106). Ce grès se présente dans le bâti comme une roche grossière, bien triée, dont les éléments constitutifs sont visibles à l'œil nu mais restent de taille inférieure à 2 millimètres. Elle est composée majoritairement de fragments calcaires, blancs, (éléments biologiques indéterminés, mais des structures en forme de tube et des sections de tige d'échinodermes ont été observées) très peu cimentés entre eux. Il a été employé dans deux monuments très peu conservés et dont l'identification reste hypothétique, le trésor X (SD 342) et le pseudo-bouleutérion (SD 221), ce qui représente un volume très limité⁸⁸.

La ressemblance avec le faciès extrait des carrières près de Levendochori, en Élide, est cependant frappante : c'est aussi un faciès de grès détritique marin, présentant les mêmes caractéristiques macroscopiques. Cependant, nous ne pouvons être assurés de la provenance car ces carrières n'ont pas été étudiées⁸⁹ et il n'y a pas d'arguments historiques qui nous permettrait de justifier une importation aussi lointaine à ce jour⁹⁰.

⁸⁸ Une estimation de 20 m³ a été calculée pour les blocs en place (voir [5.6.1](#)) : mais on ne sait pas si l'élévation des monuments était dans le même matériau. Très peu de blocs errants ont été retrouvés dans ce même faciès.

⁸⁹ Voir [Q24](#) dans la thèse. Les carrières étant de grande envergure, et le faciès sédimentaire détritique, il doit sûrement y avoir des variations de faciès au sein de la formation. Ainsi, la comparaison d'un seul échantillon de la carrière, et d'un seul échantillon de Delphes, uniquement macroscopique, ne permet pas d'assurer la provenance.

⁹⁰ Un faciès similaire a été observé à Kalydon, en Étolie, à l'ouest de Delphes : voir [3.5.2](#) dans la thèse. Mais cela reste encore une hypothèse.

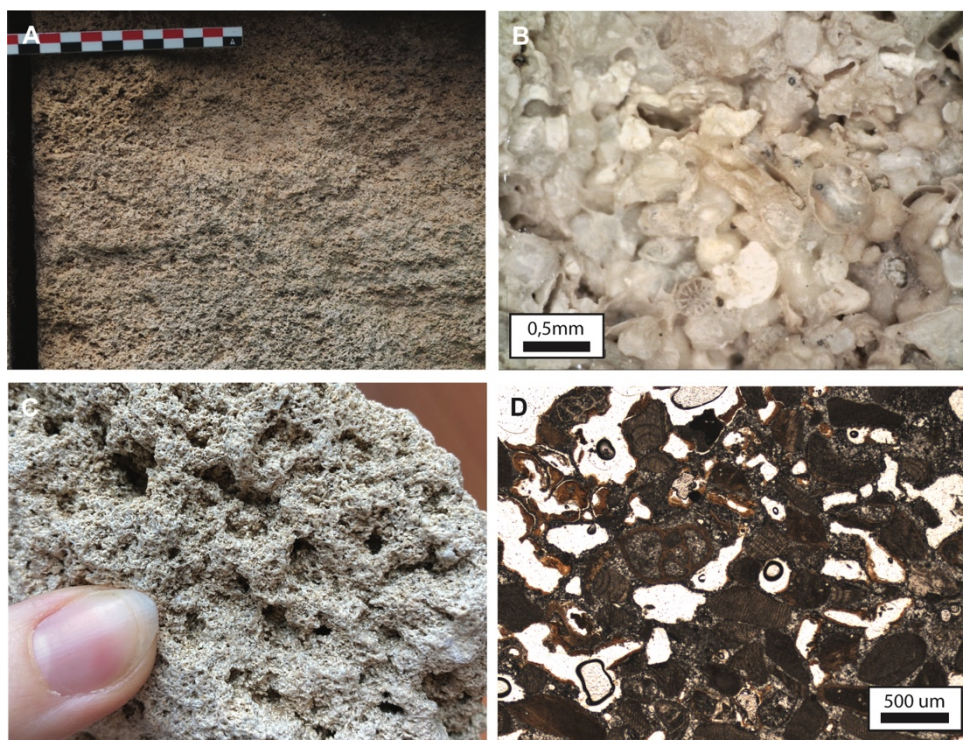


Figure 106. Les grès inconnus : le grès bioclastique.

A : mis en œuvre dans la fondation SD 221. B : vue au microscope portable. C : échantillon de la carrière de Leventochori, présentant une texture similaire au faciès employé à Delphes. D : vue microscopique du grès de Leventochori, la forme des grains et leur agencement pourraient correspondre.

Le calcaire détritique marin (Figure 107, A et B). Un grès carbonaté, mal trié, présente des clastes plus gros (galets, coquilles de gastéropodes, autres fragments) dans une matrice sableuse, avec des passées plus grossières. C'est un faciès littoral, où l'on observe l'influence marine et tidale. Il n'est associé qu'à une seule fondation, très déformée et partiellement reconstruite, identifiée comme le trésor des Béotiens ou Phocidiens (SD 226). Cependant, l'identification reste débattue⁹¹, cette dernière n'ayant jamais fait l'objet d'une étude architecturale.

Parmi les blocs errants, uniquement deux de ce même faciès ont été repérés : un bloc isolé dans le sanctuaire, sous la fondation 203 à l'est, et un second dans les parkings à bloc entre le sanctuaire et le musée. Le fait d'avoir si peu de volume conservé, pourrait indiquer que l'élévation n'était pas dans le même matériau. Une roche employée uniquement dans les fondations pourrait indiquer une provenance locale, mais le faciès géologique n'est pas

⁹¹ Elle ne se base que sur l'inscription (Guide de Delphes, 2016).

concordant avec le contexte sédimentaire de la région de Delphes. Aux vues de l'identification historique, la Béotie peut être une piste de recherche.

Le grès quartzique (Figure 107, C et D). Une arénite massive est composée de grains anguleux mais émoussés de quartz, feldspath, calcite, et quelques minéraux noirs, dans une matrice carbonatée. Il apparaît de couleur orange avec un bon tri, certains grains pouvant atteindre 5 millimètres. Il ne se trouve que dans un seul monument, les fondations du trésor de Sicyone (SD 121) : ils correspondent à des remplois, des blocs de frise de la tholos, une ancienne construction qui a été intégralement démontée pour être employée dans les fondations du nouveau trésor⁹². Ce sont les seuls blocs du monument dans ce faciès (les autres blocs de la tholos sont en dune oolithique).

La tholos a été remployée intégralement dans le trésor de Sicyone, mais les dédicants ne sont pas connus. De fait, on considère que la pierre provient de la région de Sicyone, mais aucune carrière n'a pu être identifiée précisément, et ce faciès n'a pas été observé dans les constructions antiques de la région⁹³. Les affleurements de grès locaux, dans les flyschs, ne semblent pas concordants non plus. L'hypothèse de la région de Sicyone reste valide d'un point de vue géologique.

Le grès à galets (Figure 107, E et F). Un faciès a été utilisé pour 6 blocs de larmiers, associés à la Lesché des Cnidiens⁹⁴, retrouvés non en place dans le sanctuaire. Cependant, ils sont dans un mauvais état et présente une forte altération (patine marron), ce qui complexifie l'identification de la roche. C'est un grès grossier, de type *packstone*, composé de clastes variés (majoritairement lithoclastes, quelques oïdes, et fragments de coquilles), arrondis, et mal trié (galets millimétriques), dans une matrice calcaire rougeâtre. Sans information historique, et si peu de blocs, il est difficile d'émettre une hypothèse sur leur provenance, mais ce faciès pourrait provenir de la région du Golfe.

Un calcaire rouge (Figure 107, G et H). Un bloc isolé, associé au char des Rhodiens (SD 406), est dans un faciès particulier : un grès continental fluviatile, faciès fin, lité qui

⁹² Laroche et Nenna, 1990, p.258. On ne sait pas à quoi servait la construction, ni même où elle se situait dans le sanctuaire. Un second monument a été entièrement démonté et employé dans les fondations du trésor : un monoptère, dont les métopes ont été retrouvés.

⁹³ Voir [3.2](#) et [3.5](#) dans la thèse.

⁹⁴ Laroche et Nenna, 1993, p. 236, sur des critères de dimensions.

présente de faibles joints stylolithiques. Si l'origine est inconnue, on peut noter un faciès similaire extrait de carrières sur le Cap Ténare, dans le sud du Péloponnèse, mais il est décrit comme un marbre⁹⁵.

⁹⁵ Le Tallec, 2014, p.167.

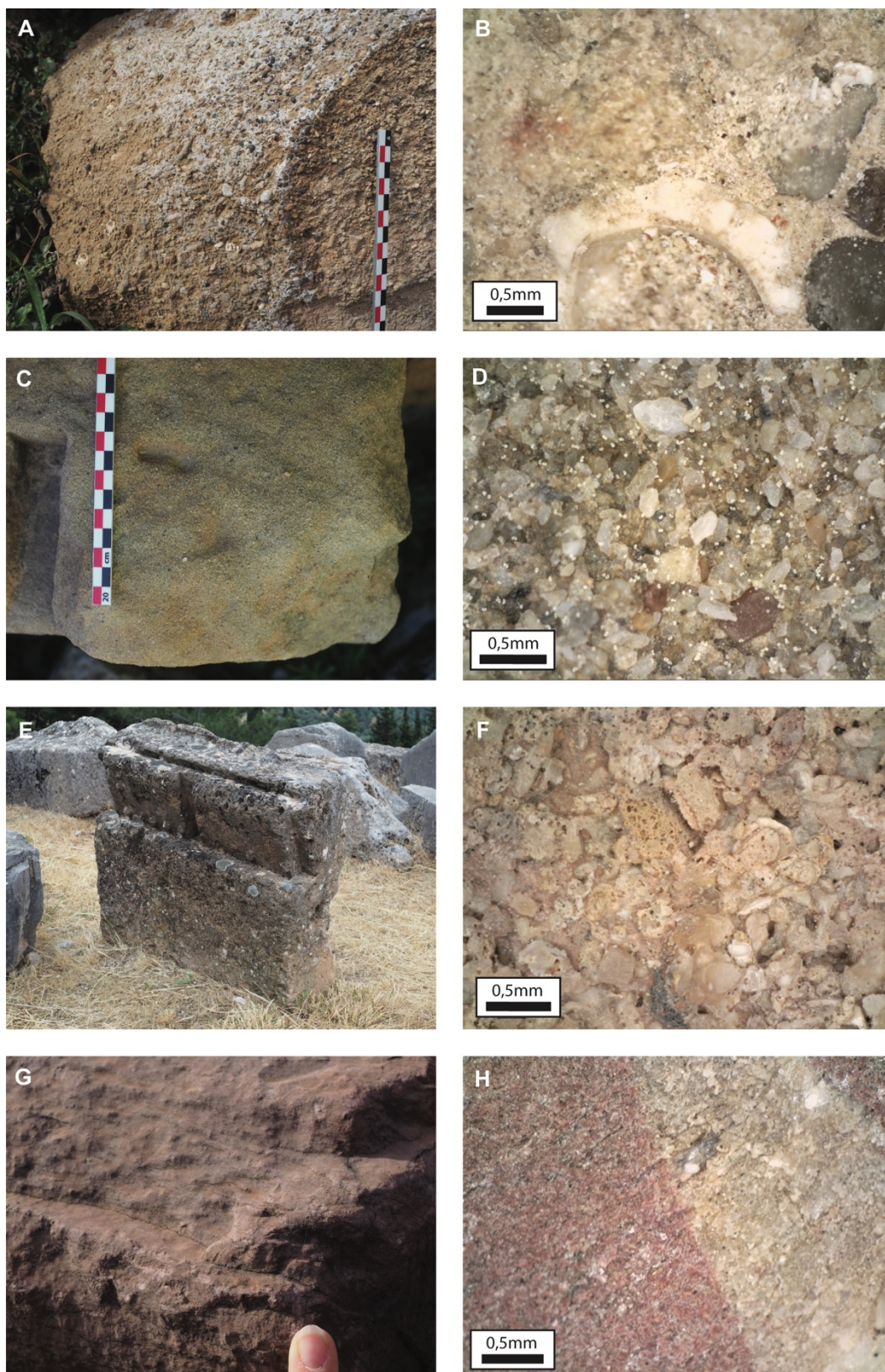


Figure 107. Les grès inconnus : le calcaire détritique marin, le grès quartzique, le calcaire à galets et le grès rouge.

5.6 Synthèse : les matériaux dans les monuments

5.6.1 Volumes de roche mis en œuvre

- **Méthodologie**

Les volumes de roche ont été calculés en se basant sur la littérature : en particulier, le *Guide de Delphes* paru en 2016⁹⁶, les fascicules « Topographie et Architecture » des monographies *Fouilles de Delphes*, et les articles parus dans le Bulletin de Correspondances Helléniques. Pour compléter ces données, des mesures sur le terrain ont été réalisées, en particulier pour les monuments qui n'ont pas fait l'objet d'étude ou de publication, et les parkings à blocs du sanctuaire d'Apollon, grâce à l'ortho-photographie⁹⁷ du site.

Les monuments ont été simplifiés en des formes géométriques élémentaires pour réaliser des calculs de volume classiques : rectangle, cylindre, triangle, parfois en anneau ou cône. Les monuments ont été ensuite classés par type⁹⁸, et les différentes parties d'un même monument ont été classées par utilisation⁹⁹.

Par exemple, le calcul réalisé pour les colonnes extérieures du Temple en tuf à Marmaria (SD 29, TE pour Temple Elevation), se résume ainsi : 36 cylindres de 4,6 mètres de haut (fût et chapiteau compris) et 0,97 mètre de diamètre, d'après le Guide, 2016 ; en dune oolithique, ce qui correspond à environ 123 m³ de matériau.

⁹⁶ Bommelaer, Laroche, 2016. Guide de Delphes. Le site. Coll. Sites et Monument, 7. 2^e éd., École Française d'Athènes, diff. De Boccard, 332 pp. Il sera cité ainsi : Guide, 2016.

⁹⁷ Réalisée au drone, avec une précision de 5 cm, réalisée en 2019 par Lionel Fadin, le topographe de l'École Française d'Athènes

⁹⁸ Par « type », nous entendons une classification que nous avons établie nous même pour regrouper des monuments semblables ou élevés dans un but similaire, pour pouvoir déterminer des motifs dans l'utilisation des pierres. Nous avons : T, O, B, P et A. Ils signifient : T : temples, trésors et tholos ; O : offrandes en hauteurs ; B : bases ; P : bâtiments publics et/ou ouverts, comme les portiques, fontaines, enclos... ; A : murs de soutènements (ou *analemma*), péribole (enceinte sacrée), escaliers.

⁹⁹ Par « utilisation », nous entendons l'utilisation dans le monument. Nous avons : F, E. Ils signifient : F : fondations, jusqu'à l'euthynthéria (l'assise de réglage) comprise, les murs de soutènements, ce qui n'est pas fait pour être visible généralement ; E : élévation, au-dessus de l'euthynthéria, comprenant la krépis (plateforme à 2 ou 3 degrés servant de soubassement), les murs, les dallages, les colonnes...

Cette valeur, qui se justifie d'un point de vue mathématique, ne reste cependant qu'indicative. C'est d'abord un volume restitué, fondé sur des hypothèses : par exemple, les indices archéologiques permettent de restituer 36 colonnes au total, mais elles n'ont pas toutes été retrouvées¹⁰⁰. C'est aussi une approximation : nous considérons le volume d'un fût lisse, sans rétrécissement¹⁰¹, ici avec le chapiteau compris. De même, les murs subissent une approximation parfois drastique pour simplifier les calculs : une épaisseur moyenne est utilisée, en considérant des parements parallèles, avec les petites ouvertures volontairement ignorées.

Estimation et approximation : l'approche quantitative a nécessité des choix, le calcul des volumes exacts est une entreprise interminable et fondamentalement peu intéressante. On peut considérer que les inconnues sont trop grandes pour une plus grande précision : entre l'extraction et la mise en œuvre, le pourcentage exact de perte est encore difficilement estimable. Certaines estimations réalisées montrent une perte pouvant aller de 25% à 100% de la roche, en fonction de sa nature, voire plus¹⁰². De plus, on sait que les blocs étaient transportés avec une gaine de protection qui représentait environ 10 % du volume total, pour que les finitions soient réalisées sur place¹⁰³.

Cependant, pour rester cohérents et obtenir des résultats comparables entre eux, un principe de réserve sera appliqué et les volumes seront délibérément sous-estimés, plutôt que l'inverse. Le « volume minimal mis en œuvre » possède plus de sens qu'un « volume maximum », puisqu'il identifie ce qui existe de façon sûre. Enfin, les volumes restitués sont calculés quand les données archéologiques le permettent ; sinon, le volume des vestiges en place sera uniquement indiqué.

¹⁰⁰ Guide, 2016, p.75-76. Aujourd'hui, il ne subsiste que 3 colonnes encore en place.

¹⁰¹ C'est le cas de ces colonnes du temple en tuf : elles contiennent dans leur hauteur la valeur de 4,55 à 4,9 diamètres, avec cannelures. Cependant, quand cela est possible, des valeurs moyennes seront utilisées : c'est le cas ici.

¹⁰² Amandry et Hanse, 2010, p.456. C'est un dire, pour extraire un bloc de 1m³, il faut enlever une masse totale de roche entre 1,25 et 2m³. Extrapoler à des volumes plus grands, cela représente des volumes non négligeables, que nous ne savons pas, pour l'instant, calculer. D'après les auteurs, il aurait fallu extraire pour la construction du Temple du IV^e siècle, environ 9000 m³ de calcaire de Saint-Élie et 6000 m³ de dune de Corinthe, alors que le volume mis en œuvre est seulement de 1760 et 4720 m³ respectivement, soit un facteur de 5,1 et 1,7.

¹⁰³ Le volume que représente la gaine de protection n'a jamais été mesuré et estimé scientifiquement, à notre connaissance. D'après D. Laroche, la gaine de protection de devrait pas dépasser 10% du volume total de la roche, d'après son expérience avec des tailleurs de pierre (communication personnelle) : 10% est même déjà trop important, car il faut prendre en compte le temps pour l'enlever.

- **Remarques**

Quelques points sont à souligner pour comprendre nos résultats. Premièrement, l'histoire de Delphes s'étale sur plusieurs siècles : de nombreux monuments ont été détruits, remployés, ou ont potentiellement disparu. L'état que l'on observe aujourd'hui du site est un arrêt sur image des Grandes Fouilles de la fin du XIXe siècle (le niveau de sol) et les vestiges sont représentatifs des derniers états du sanctuaire avant son abandon. Les périodes les plus anciennes, antérieures à 548/47, sont les moins connues ou les moins documentées : par exemple, uniquement un trésor peut être daté d'avant 600, le trésor de Corinthe (SD 309)¹⁰⁴. Ce sont aussi les vestiges les plus réduits, uniquement des fondations, dont il n'est pas toujours possible de reconstruire l'élévation¹⁰⁵.

Enfin, il faut mentionner la surreprésentation des élévations (volume et nombre) car les fondations sont généralement inaccessibles et les parkings à blocs ont été pris en compte dans l'étude. Les informations concernant les principaux analemmas (murs de soutènement) du site proviennent de la thèse de E. Trouki, 1993 (non publiée, à paraître).

- **Résultats**

Le graphique ci-dessous présente les résultats obtenus, en pourcentage du volume total, à l'échelle du site entier pour toutes les périodes confondues : le sanctuaire d'Apollon, le sanctuaire d'Athéna Pronaia (ou Marmaria), le Gymnase, le stade, et les murs de soutènement de la ville (**Tableau 11**). Les résultats sont présentés par faciès, et le volume comme le pourcentage de pierre que cela représente sur le volume total calculé. Les détails sont présentés dans l'**Annexe**, avec les volumes calculés et les utilisations.

La ville n'est pas prise en compte car elle n'est pas aujourd'hui accessible pour les états classique et hellénistique : l'état visible est tardif (briques). La fontaine Castalie est aujourd'hui

¹⁰⁴ Laroche et Nenna, 1993, p.228.

¹⁰⁵ Par exemple, le calcaire coquillier n'a été retrouvé en place que dans la fondation d'un trésor (SD 216), qui se trouve derrière le mur des Mégariens (SD 217). Cependant, des blocs supplémentaires dans ce même faciès ont été identifiés dans les parkings à blocs. Or, un de ces blocs a été assigné à la fondation SD 228, fondation construite en dune oolithique (Laroche et Nenna, 1993).

inaccessible car elle se situe dans un ravin où des chutes de pierres ont régulièrement lieu. Enfin, une estimation des volumes non étudiés est aussi présentée, indiquée par le signe (x).

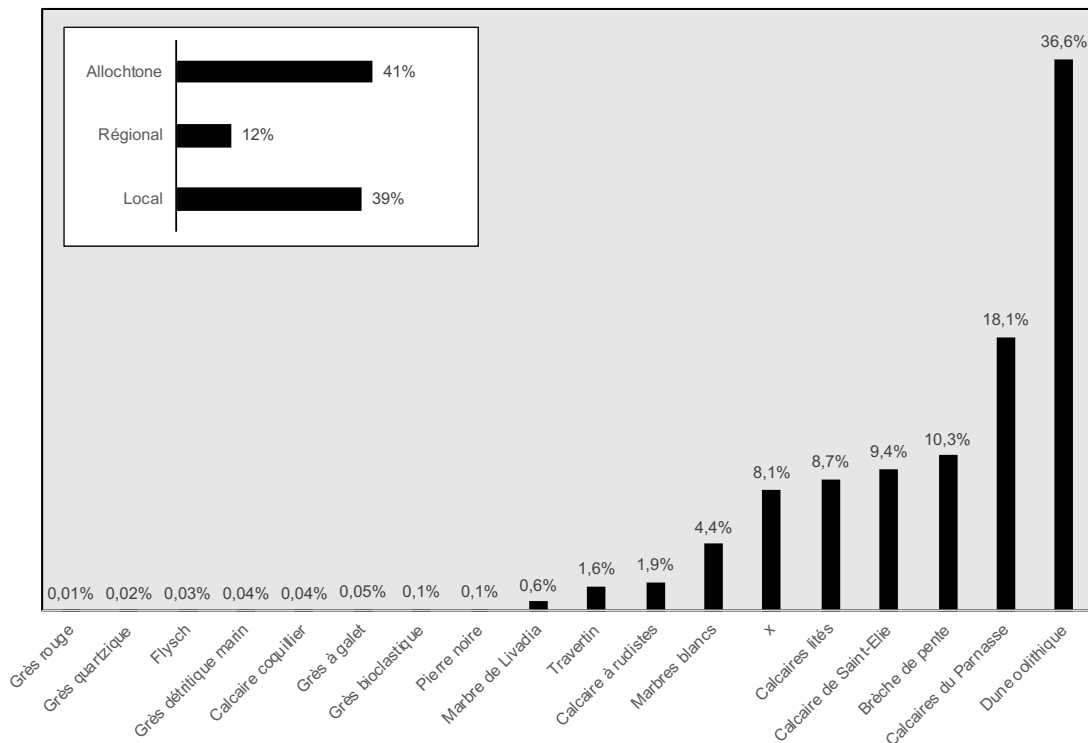


Tableau 11. Volume (en %) de chaque faciès mis en œuvre à Delphes.
Toutes périodes confondues. Dans l'encadré, ce que cela représente en termes d'origine.

5.6.2 Évolution de l'utilisation des pierres dans le temps et l'espace

Deux analyses sont proposées ci-dessous, dans le but de nuancer nos résultats globaux : une analyse par utilisation des pierres, et une analyse temporelle.

- **Utilisation des pierres**

Les observations de terrains et l'identification des matériaux permet de produire un plan lithologique du sanctuaire d'Apollon de Delphes : il présente la nature des vestiges en place et des blocs errants (**Figure 108**). Le travail est réalisé en parallèle du SIG du site et le plan de Delphes n'étant pas à ce jour finalisé (programme en cours à l'EFA, dir. Amélie Perrier), c'est un plan non fini qui est présenté.

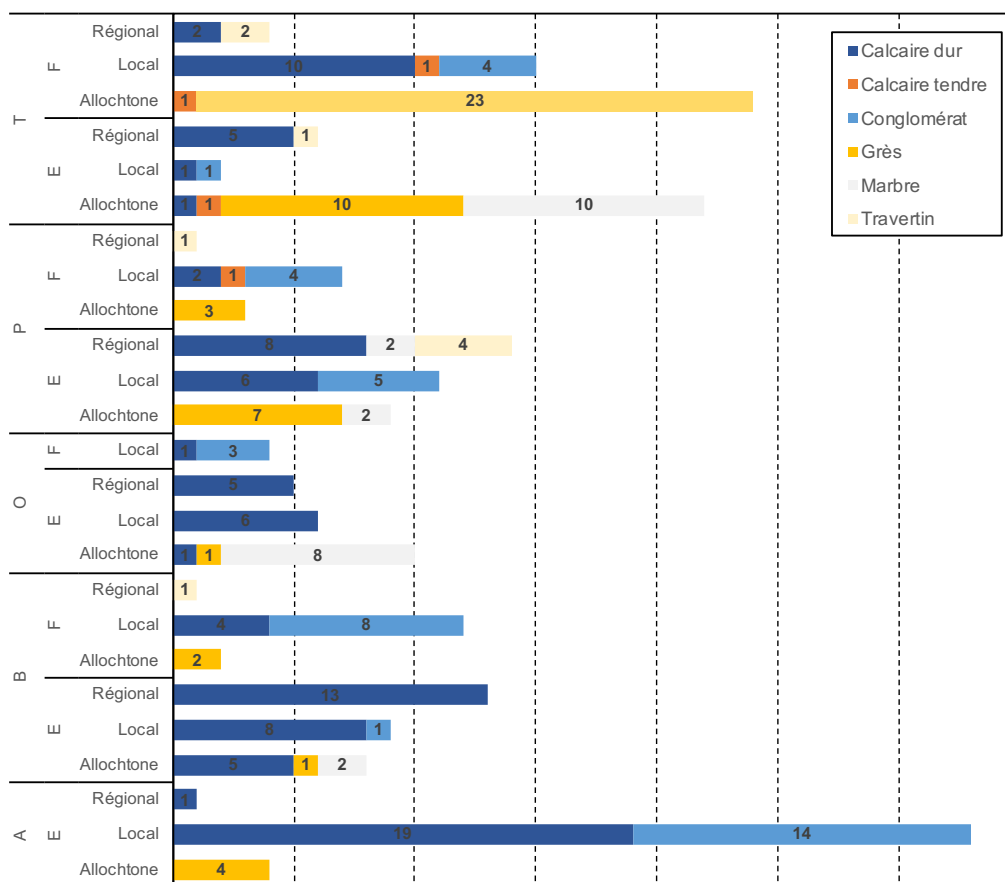


Figure 108. Plan lithologique des vestiges en place et des blocs errants dans le sanctuaire d'Apollon à Delphes. Dans la légende, les chiffres indiquent le nombre de blocs errants identifiés pour chaque faciès.

Pour mieux comprendre l'utilisation des pierres, les utilisations des pierres ont été étudiées (E - élévation ou F - fondation) pour des regroupements de bâtiments par type : temples et trésors (T), offrandes en hauteur (O), bases de statues (B), bâtiments ouverts et/ou publics (P), analemme ou murs de soutènement (A). La classification des pierres a été appliquée ici :

- Les calcaires durs : calcaires du Parnasse, calcaires lités, calcaire à rudistes, calcaire de de Saint-Élie, et les pierres noires ;
- Le conglomérat : la brèche de pente ;
- Le calcaire tendre : flysch et calcaire coquillier ;
- Les grès : la dune oolithique et les quatre faciès inconnus ;
- Le travertin : tuf du Pléistocène ;
- Les marbres : marbres blancs de l'Attique, des Cyclades, et le marbre noir de Livadia.

Il est cependant trop risqué de faire une analyse en volume à ce stade de l'étude, pour les raisons mentionnées auparavant. L'analyse se présente donc comme le nombre d'occurrence par utilisation (**Figure 109**) : ces résultats sont donc dépendant du nombre de vestige conservé et accessible (le nombre de fondation n'est pas toujours égal à celui d'élévation). Par exemple, la première ligne correspond au nombre de fois où des faciès régionaux ont été observés dans les fondations des temples et trésors : 2 fois des calcaires durs, 2 fois des travertins. Les faciès sont regroupés par origine et par nature ; comme les fondations sont sous-représentées, le tableau montre les pourcentages que représente l'origine des faciès dans l'élévation uniquement.



Type	Local (%)	Régional (%)	Allochtone (%)
A	87	3	11
B	30	43	27
O	29	24	48
P	32	41	26
T	7	20	73

Figure 109. Nombre d'occurrence des roches mises en œuvre dans le site de Delphes, par origine et utilisation.

Les analemmas ou murs de soutènements (A) ne sont considérés que comme des élévations.

On observe plusieurs tendances. Des différences significatives existent entre les types de monuments, mais les fondations sont majoritairement dans un matériau local, avec une faible diversité (2 types de roche). L'élévation est dans un matériau régional ou allochtone, à l'exception des murs de soutènement : les bases (B) et les bâtiments ouverts (P) sont majoritairement construits avec des faciès régionaux puis allochtones, alors que les offrandes (O) et les trésors (T) sont dans des faciès allochtones, puis régionaux.

Quelques valeurs isolées mettent en exergue les emplois, c'est-à-dire l'utilisation des pierres d'un monument lorsque celui-ci est détruit, volontairement ou non : les occurrences de grès allochtones dans les analemmas (A), les fondations des bases (B), des offrandes (O) et des

bâtiments publics (P) correspondent uniquement à la dune oolithique. Cette dernière proviendrait du temple du VI^e siècle, détruit en 373.

Enfin, l'exception se trouve dans les temples et les trésors (T) : contrairement aux élévations des autres monuments, l'élévation est surreprésentée, en proportion, par les faciès allochtones (73%) (**Figure 109**). Dans le détail, les rares faciès locaux observés en élévation correspondent à l'emploi de brèche dans le bâtiment SD 402, et l'emploi de calcaire lité pour la première assise du trésor éolique (SD 33). Or le premier est un bâtiment dont l'attribution à un trésor est débattue, mais la façade est en calcaire de Saint-Élie : il y a un effort dans le choix des matériaux. Les deux autres occurrences de faciès allochtones autres que les grès sont la pierre noire de la Tholos (SD 40), et des blocs de frise isolés en calcaire coquillier. Ces occurrences sont donc exceptionnelles ou liés à des petits volumes : les élévations sont en grès ou en marbre sinon. Mais sur les 10 occurrences de grès, 9 correspondent à la dune oolithique de Corinthe : elle apparaît comme matériau de prédilection.

Cette surreprésentation s'observe aussi dans les fondations des temples et trésors : elles sont divisées entre les faciès locaux et allochtones, mais surtout sur des grès allochtones. Sur les 23 occurrences, 21 correspondent à la dune oolithique de Corinthe. Les deux autres occurrences correspondent au grès coquillier, au grès marin, et au calcaire coquillier de Mégare. Il ne semble pas que le choix de la roche pour les fondations soit réfléchi en termes de faciès, mais plutôt d'importation et de roche disponible.

- **Évolution temporelle**

Si les données peuvent être interprétées du point de vue de l'utilisation, il est aussi pertinent de les regarder dans le temps. La construction du sanctuaire de Delphes au fil des siècles est complexe et marquée par de nombreux conflits et catastrophes : en particulier, la destruction du temple d'Apollon par le feu en 548/7 avant JC, qui entraîne un réaménagement global du sanctuaire, et de nouveau en 373/2 avant JC suite à un tremblement de terre. Quatre guerres sacrées (entre 600 et 590, puis en 448, entre 356 et 346, et en 339/8, avant JC) vont aussi influencer l'avancement des travaux, les dédicants, et les financements disponibles.

A ce stade de l'étude, j'ai décidé de diviser la période étudiée en quatre fourchettes chronologiques uniquement : avant 480, entre 480 et 373/2, entre 373/2 et 323, et entre 323 et 31. Ce sont les dates des périodes archaïque, classique et hellénistique, mais la période classique a été divisée en deux : 373/2 marque la destruction du temple d'Apollon par un glissement de

terrain, ce qui a engendré de grands aménagements dans le sanctuaire. Ces choix peuvent être discutés, surtout du point de vue de l'histoire locale de Delphes, mais les données actuelles ne permettent pas une plus grande précision.

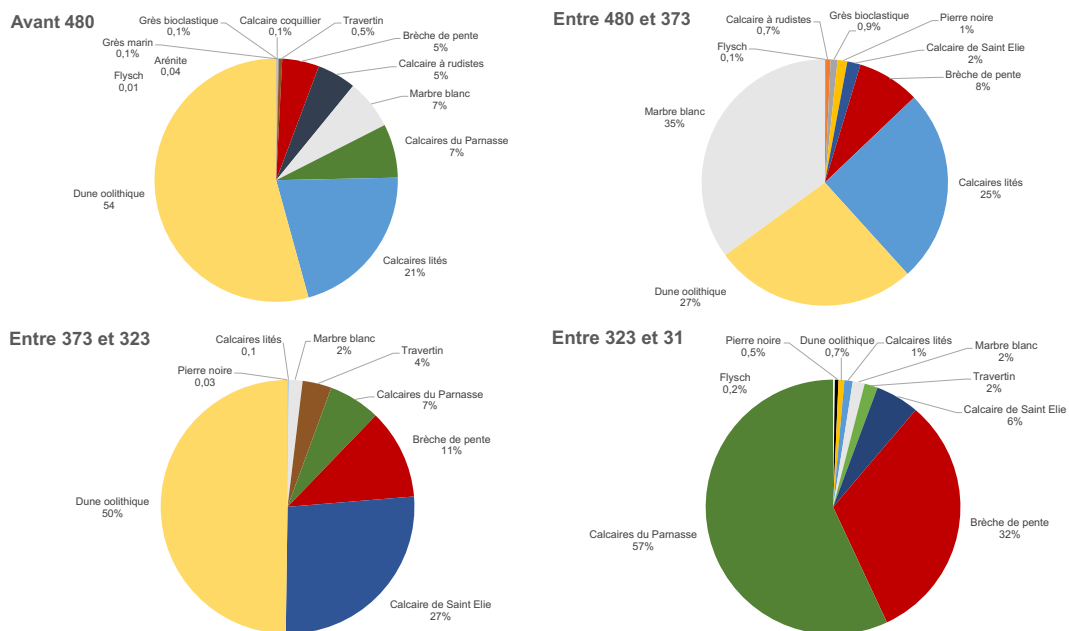
Les résultats sont présentés dans la **Figure 110**. On observe plusieurs tendances :

- Pendant la **période archaïque** (avant 480), la domination des faciès allochtones diversifiés dans la construction delphique (61%), avec la dune oolithique de Corinthe qui domine.
- **Entre 480 et 373**, c'est-à-dire pendant l'époque classique avant la destruction du Temple d'Apollon, la prédominance des faciès allochtones est toujours marquée (64%). Cependant, la construction en marbre devient dominante, cependant dans des proportions différentes : on importe moins de dunes oolithiques en termes de volume.
- **Après la catastrophe de 373**, l'apparition d'une exploitation régionale des pierres avec le calcaire de Saint Elie (27%). L'importation de roches allochtones diminue mais reste significative (52%), mais c'est le temple d'Apollon uniquement qui représente l'importation de dune oolithique de Corinthe (et quelques rares emplois). Les roches locales sont moins employées, en particulier les calcaires lités qui disparaissent. Si la reconstruction du temple a sûrement entraîné la recherche d'un nouveau matériau, la disparition d'une ressource locale a peut-être aussi influencé ce choix. Cette hypothèse est soutenue par le fait qu'aucune carrière antique de calcaires lités n'a été retrouvée : peut-être elles n'existent plus.
- A partir de la **période hellénistique** (323), l'importation de roches allochtones disparaît et les roches locales deviennent prédominantes (90%).

Nos données soutiennent plusieurs hypothèses soulevées sur l'utilisation tardive de la brèche de pente dans la construction delphique¹⁰⁶, et l'ouverture des carrières de Saint-Élie pour la reconstruction du temple d'Apollon¹⁰⁷. Mais les données doivent être aussi remises en question : de nombreux bâtiments sont encore mal datés à Delphes.

¹⁰⁶ La brèche de pente aurait été utilisée en quantité qu'à partir du IV^e siècle (Homolle, 1897, p. 577-578).

¹⁰⁷ L'hypothèse de l'ouverture des carrières de Saint-Élie pour la construction du temple d'Apollon a été émise (Amandry et Hansen, 2010) et semble se confirmer ici. Cependant, on peut voir que le calcaire de Saint Elie apparaît avant 373 : pour la Tholos, dont la datation est encore sujette à débat (380-370).



Période	Nombre de faciès mis en œuvre	Volume (m ³)	Volume local (%)	Volume régional (%)	Volume allochtone (%)
Avant 480	12	10775	38	0	61
Entre 480 et 373	9	1114	34	2	64
Entre 373 et 323	8	9555	18	30	52
Entre 323 et 31	9	4048	90	7	3

Figure 110. Évolution de l'utilisation des pierres (en volume %) dans le site archéologique de Delphes.

6 Interprétation et discussion

Sommaire

[6.1 La classification des roches](#)

[6.2 Les matériaux de construction](#)

[6.2.1 Une exploitation diversifiée des pierres calcaires](#)

[6.2.2 Nouvelle approche sur l'identification des pierres et des carrières](#)

[6.2.3 Le cas de Delphes : une exception à l'échelle du Golfe](#)

[6.3 Les échanges de pierre](#)

[6.3.1 Les limites d'exportation des pierres calcaires](#)

[6.3.2 La provenance : locale ou régionale ?](#)

[6.4 Le choix des roches](#)

[6.4.1 Comparaison des propriétés physiques et de l'utilisation](#)

[6.4.2 Nouveau protocole d'analyse des pierres](#)

6.1 La classification des roches

La classification des pierres calcaires employées en construction, expliquée en [2.2.1](#), se base sur des critères géologiques et la mise en œuvre des pierres dans les bâtiments. Elle permet de travailler sur le terrain, à l'échelle macroscopique, et comparer des sites entre eux, même quand ils ne possèdent aucun faciès en commun. Une nuance est ensuite apportée sur l'origine de la pierre : locale, régionale ou allochtone (par rapport au site étudié).

On pourrait questionner l'utilité d'une classification qui reste assez simple. Il faut d'abord mentionner que son utilisation doit obligatoirement s'accompagner d'une description géologique précise des roches : elle ne la remplace pas. Elle permet uniquement de réaliser une approche à grande échelle, prenant en compte des sites archéologiques qui n'ont pas toujours le même contexte géologique exactement, et donc les mêmes ressources.

Sous la dénomination de « calcaires durs », sont regroupés des calcaires gris clairs à stylolithes du Maastrichtien (comme à Delphes, [site n°1](#)), des calcaires jurassiques beiges à jaunes et massifs (comme à Mavrovouni, [site n°9](#)), des calcaires éocènes à nummulites, noirs (comme à l'Héraion d'Argos, [site n°30](#)). Ce sont des faciès différents, mais qui présentent des propriétés physiques similaires : une très faible porosité (entre <1% et 5%) et donc une densité

proche de 2,7 g/cm³. Ils sont plus ou moins fragiles mais présentent une forte résistance et un comportement cassant (voir [4.3.6](#)). Ils ont donc généralement subi un enfouissement et une compaction plus importante : ils sont aussi plus vieux en moyenne (mésozoïques).

On peut alors envisager de rajouter un degré de précision sur la nature de la roche. Aux vues des résultats, rajouter un critère géologique (comme l'âge) n'aurait pas de sens, et ne reflèterait pas les connaissances des constructeurs de l'époque : tous ces faciès sont employés plus ou moins de la même façon. S'il faut rajouter une nuance, il serait plus cohérent de le faire du point de vue de l'utilisation, comme la couleur, plutôt que de la nature géologique de la roche : par exemple, les calcaires noirs ont été les seuls exportés sur de très longues distances (voir [4.4](#)).

La nouveauté est la division des « pôros » en trois catégories : les grès, les travertins et les calcaires tendres, qui s'ajoutent aux autres roches (les calcaires durs, les conglomérats, les marbres). S'ils présentent tous des porosités élevées (voir [4.3.3](#)), et donc une densité faible, ils se différencient par leur texture.

Les grès regroupent les roches sédimentaires composées de grains inférieurs à 2 millimètres, sans considérer la forme ni la nature des grains. La dune oolithique de Corinthe et la calcarénite de Kenchrées font partie de cette catégorie, mais aussi l'arénite que l'on trouve à Delphes (voir [5.5](#)), le calcaire bioclastique de Leventochori ([Q24](#)), et des faciès plus grossiers, à tendance conglomératique (d'origine inconnue comme en Béotie, à Livadia par exemple ([site n°19](#))). Les faciès regroupés sont homogènes et présentent des propriétés physiques similaires (voir [4.3.3](#)).

Les limites de cette classification s'expliquent aussi par le sujet abordé : le travail sur des vestiges, par définition parcellaires, de constructions en pierre. Les données ne sont donc pas très nombreuses : avec en moyenne 4 faciès différents par site (voir en [3.6](#)), sur les 37 sites archéologiques étudiés, cela fait 148 roches différentes. S'il faut les catégoriser dans 6 classes, réparties sur 3 origines (local, régional, allochtone), on obtient en moyenne 8 roches par catégorie. Ce chiffre est suffisant pour pouvoir observer des motifs dans l'utilisation des pierres : rajouter une catégorie nous donnerait des valeurs parfois trop faibles (faciès isolés dans une catégorie) pour pouvoir en tirer des conclusions à grande échelle.

Finalement, la classification se limite aussi aux roches disponibles dans la région étudiée, le Golfe de Corinthe, avec les marbres. Or, on sait que des roches volcano-clastiques et volcaniques (tuff, pierre ponce) ont été employées, par exemple à Délos : dans la

classification actuelle, elles ne rentrent pas dans les cases et une nouvelle catégorie devrait être ajoutée. C'est aussi lié au contexte géologique régional : c'est pour cela que l'étude s'est ici concentrée sur une région fermée, le Golfe de Corinthe.

La classification est donc dépendante de l'échelle d'étude. On peut envisager de rajouter des catégories (dans les faciès géologiques, dans la provenance, pour l'utilisation) si l'on travaille à une échelle plus réduite. La multiplication des données, en complétant celles obtenues lors de la thèse, permettra aussi d'affiner la classification : si on considère que l'ensemble étudié dans cette thèse est suffisant pour déterminer des tendances globales, il faudrait réaliser plus d'études sur site pour confirmer nos hypothèses.

6.2 Les matériaux de construction

6.2.1 Une exploitation diversifiée des pierres calcaires

- **Les motifs globaux dans l'utilisation des pierres**

Dans la **Figure 111**, sont présentées les données tirées des sites archéologiques, interprétées en fonction de la classification établie. Elle donne donc l'image des proportions de chaque roche, en fonction de son origine, pour **un site type de la région du Golfe de Corinthe**.

On observe plusieurs tendances. Pour chaque catégorie de roche, les faciès sont tous majoritairement locaux, et leur utilisation diminue avec l'éloignement.

Plus précisément, les calcaires durs sont le faciès le plus employé dans la construction, toutes origines confondues (37,9 %). Ils sont majoritairement locaux, mais une partie est aussi importée à l'échelle régionale voire allochtone. Les calcaires importés représentent un volume toujours très faible, associés à une utilisation limitée (bases de statues, stèle, plaquage). La seule exception est Delphes avec le calcaire de Saint-Élie (voir [5.3.2](#)), un faciès régional, qui est employé pour le temple d'Apollon. Les conglomérats représentent le deuxième faciès le plus employé pour la construction, toutes origines confondues (31,8%). Ils sont toujours locaux : ils ne sont jamais importés.

Les travertins et les calcaires tendres suivent la même tendance : ils sont de moins en moins importés, plus l'éloignement à la carrière est grand. Cependant, les travertins représentent des roches régionales les plus importées (4,5 %), mais ils ne sont jamais

allochtones. En effet, il n'y a pas de carrière de grande envergure de travertin, à l'exception de celles de Kléonai (Q22), mais qui semble avoir fourni la région alentour uniquement. Les données pour le local sont donc à prendre avec précaution : seulement trois sites emploient du travertin, mais ils sont construits entièrement dans ce faciès (Némée, Kléonai, Perachora).

Cette tendance s'observe aussi pour les grès et les marbres, mais avec une plus forte importation allochtone en comparaison avec les autres faciès légers. Si la recherche de marbre, pour la sculpture ou les parties sculptées des monuments, est connue, nos résultats montrent une importation de grès sur de longues distances, comparable aux marbres. Cela reste à ce jour non étudiée dans les détails.

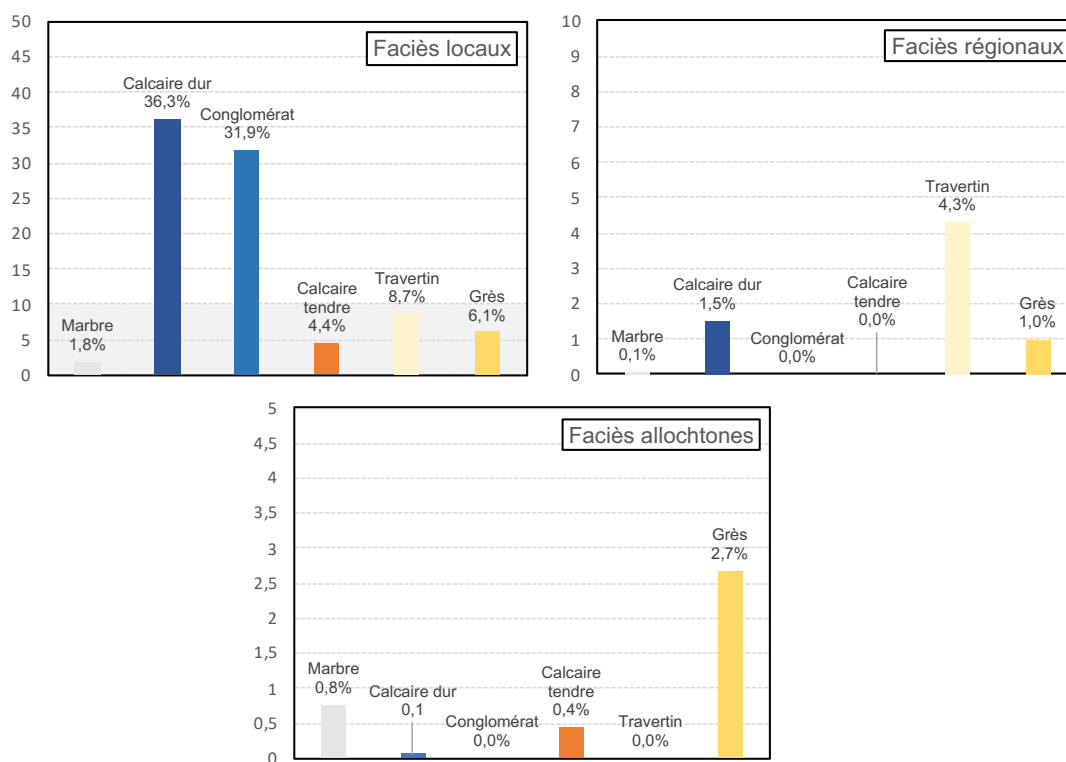


Figure 111. Répartition du type de roche employé dans la construction, en fonction de l'origine, dans la région de Corinthe.
 Synthèse des données sur les 37 sites archéologiques étudiés : il faut comprendre, le calcaire dur local représente en moyenne 36,4 % du volume total de roche, celui régional représente 1,2 %, et celui allochtone 0,1%. Les échelles verticales ne sont pas les mêmes : les graphiques « faciès régionaux » et « faciès allochtones » sont contenus dans la zone grisée du premier graphique.

- **Influence du contexte géologique ou de la nature du site archéologique**

Les sites proches des grands centres carriers emploient la roche produite, et cela pour l'intégralité de la construction du site : c'est le cas de Corinthe, Kléonai et Némée. C'est aussi très probable pour Mégare. Ces roches sont donc considérées comme locales dans ces sites, alors qu'elles sont allochtones pour les autres sites du Golfe de Corinthe.

Le marbre local de 1,8% correspond à un seul site, qui n'est représenté que par un monument, le Temple de Zeus à Livadia ([site n°19](#)). C'est aussi le seul site qui se situe proche de carrières de marbre gris, le seul affleurement de marbre de la région : il n'est donc pas représentatif des sites du Golfe. Ainsi, si on enlève cette donnée, le marbre est la seule roche qui n'est pas dans la tendance, et qui est plus importée.

Ces exemples montrent l'influence du contexte géologique local de chaque site sur les matériaux employés : c'est à prendre en compte dans nos résultats de la **Figure 111**. En effet, on observe des tendances légèrement différentes quand on isole les résultats par région et par type de vestige (sanctuaire/ville) (**Tableau 12**). Pour la diversité de roche (nombre de faciès), on note une augmentation pour l'Argolide, toutes origines confondues. La différence entre sanctuaire et ville (qui regroupe les autres sites) s'illustre dans la variété et les proportions, mais uniquement pour les faciès importés (régionaux et allochtones).

Type	Faciès locaux	Faciès régionaux	Faciès allochtones	Volume local (%)	Volume reg. (%)	Volume allo. (%)
Delphes	4	4	12	41,0	12,0	47,0
Béotie	1,7	0,2	0,9	96,5	2,4	1,2
Corinthe	2,7	1,1	1,1	90,1	8,8	1,1
Argolide	3,2	1,6	2,4	68,8	23,5	7,3
Sanctuaire	2,8	1,3	3,2	83,5	9,0	7,6
Ville	2,1	0,5	0,7	92,6	5,7	1,6

Tableau 12. Nombre de faciès et volumes associés, par région ou type de vestiges.

Les sanctuaires d'Épidaure et d'Olympie ne sont pas pris en compte dans les estimations volumétriques, car elles n'étaient pas possibles.

Il y a donc deux facteurs qui influent sur les pierres calcaires employées dans la construction : la position géographique et la renommée du site. Si on enlève des principaux sanctuaires (Delphes, Épidaure, Némée, Isthmia, Ptoion) et les sites aux extrêmes (l'ouest du Golfe) (**Figure 112**), on observe cependant, pour la nature des roches cette fois, des tendances similaires à la **Figure 111**.

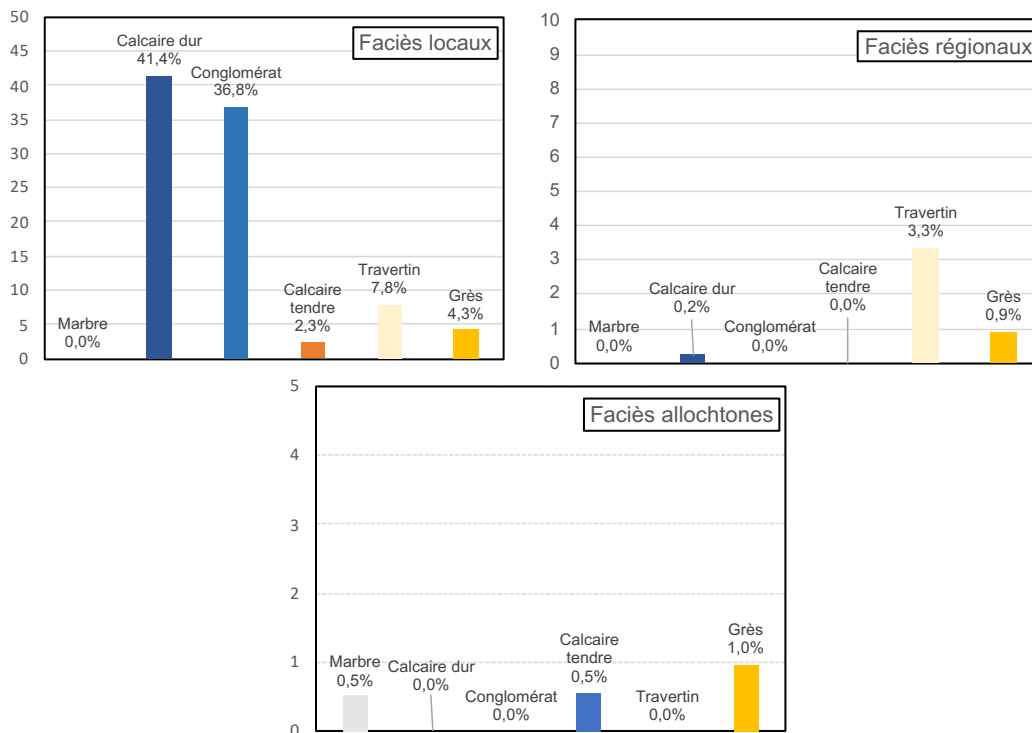


Figure 112. Répartition du type de roche employé dans la construction dans la région de Corinthe, à l'exception des sanctuaires.

Les échelles verticales ne sont pas identiques.

En conclusion, la renommée d'un site ne semble pas influencer sur la nature des roches utilisées : calcaires durs et conglomérats locaux, et ce sont toujours les grès, les marbres et certains calcaires durs qui sont recherchés. La variété des faciès dépend de la position géographique, donc les ressources accessibles : c'était une hypothèse émise par (Martin 1965). Si les données ne sont pas assez nombreuses, il semblerait que les sites en domaine montagneux et/ou isolés (Delphes et Argolide) présentent une diversité plus grande de faciès locaux. A ce facteur s'ajoute la renommée du site, en particulier pour les sanctuaires, qui dicte la diversité des faciès importés uniquement, et donc des volumes associés.

6.2.2 Nouvelle approche sur l'identification des pierres et des carrières

Nos résultats permettent d'établir, autour d'un site archéologique, la répartition des faciès par nature et origine (**Figure 113**). Ce schéma résume les observations à l'échelle du

Golfe : nous venons de voir que la définition des origines est parfois relative à l'implantation géographique du site étudié.

Par exemple, les données sont trop éparées pour que nous soyons fermes sur la position du calcaire tendre : il y a trop peu de faciès dans cette catégorie, avec le calcaire coquillier de Mégare qui est exporté et domine, alors que les autres calcaires tendres sont locaux (faciès détritiques fins).

La classification actuelle signifie mettre dans la même catégorie de « calcaire tendre », des faciès détritiques peu consolidés (comme au Ptoion, [site n°15](#), ou au Kabirion de Thèbes ([site n°13](#)) et les calcaires coquilliers (comme celui de Mégare, [Q12](#)). Les premiers sont systématiquement locaux, alors que le calcaire marin de Mégare est exporté. Dans une approche globale, cette information est perdue, alors qu'elle peut être liée à la nature géologique de la roche : le calcaire coquillier est tout aussi léger, mais de meilleure durabilité. Un degré de précision devrait alors être rajouté : une nouvelle limite de provenance est proposée pour faire ressortir des motifs dans l'utilisation des calcaires tendres (**Figure 113**). Cependant, la carrière de Mégare est pour l'instant la seule connue. Enfin, les calcaires durs noirs et les grès ont été ajoutés dans la catégorie « régionale » car leurs extensions restent encore à être déterminées précisément (voir la partie suivante, [6.3.1](#)).

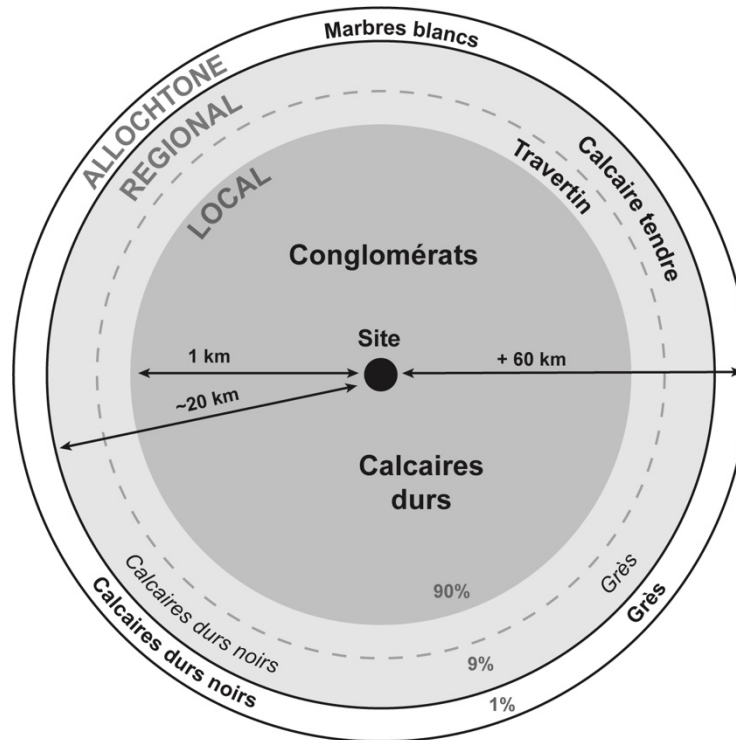


Figure 113. Schéma théorique de la provenance des roches autour d'un site type dans la région du Golfe de Corinthe.

6.2.3 Le cas de Delphes : une exception à l'échelle du Golfe

Le but de cette étude était de remettre le sanctuaire de Delphes, dont l'étude a pu être plus poussée, dans le contexte global de l'emploi des pierres dans le Golfe de Corinthe. Une vingtaine de faciès différents ont été identifiés (voir le [chapitre 5](#)) et les volumes sont ici repris et interprétés selon la classification établie (**Figure 114**). Les volumes sont très différents de ce que l'on voit aujourd'hui dans le site archéologique : l'élévation est manquante (majoritaire dans les faciès légers) et c'est le dernier état qui est conservé : or la période hellénistique est marquée par l'arrêt de l'importation de faciès allochtones ([5.6.2](#)). Les résultats bruts dans le site ont déjà été discutés préalablement : ici, nous les regarderons dans le contexte global du Golfe de Corinthe, toutes périodes confondues, et Delphes dans sa globalité comme un site et un sanctuaire.

On observe que Delphes rentre dans les tendances générales observées à l'échelle du Golfe : calcaires durs et conglomérats locaux, travertins régionaux, marbres et grès importés. Les principales différences résident dans les proportions, par rapport aux autres sites (**Figure**

111) : c'est le seul site à avoir exploité un calcaire dur régional en grande quantité (le calcaire de Saint-Élie), qui montre une importation extraordinaire de grès allochtone (près de 40% du volume de roche, pour une moyenne de 2% dans les autres sites) et de marbres allochtones employés dans le bâti (près de 5% du volume de roche). Le seul site qui peut lui être comparable est Épidaure : si la variété de roche est plus faible, l'exploitation régionale est aussi attestée (Varti-Matarangas & Matarangas 2000).

Il faudrait comparer ces données sur la nature des pierres et leurs origines, à ce que l'on connaît des chantiers de construction et l'« industrie » de la pierre dans l'Antiquité. Ch. Feyel (2007) et V. Mathé (2010) ont étudié les comptes de construction des sanctuaires, respectivement du point de vue des artisans et du prix de la construction. Ils concluent tous les deux que le monde de la construction présente une extrême diversité, composé de petites entreprises, d'une main d'œuvre hétérogène (origine, spécialité, statut) et de prix tout aussi variables. Cependant, la raison derrière cette fragmentation n'est pas interprétée de la même façon : V. Mathé la lie au fait que la construction sacrée s'inscrit dans le temps long, et donc sans souci d'économie particulier ; au contraire, Ch. Feyel l'interprète comme une recherche du moindre coût, au point de multiplier les interprètes pour trouver la meilleure offre. Cependant, les comptes ne présentent qu'un aperçu de l'organisation du travail, pour la construction sacrée, à un moment donné : ceux retrouvés à Delphes par exemple ne concernent que de la reconstruction du Temple d'Apollon en 373 avant JC. Ils ne concernent aussi que rarement les carriers : on ne peut pas les extrapoler aux chantiers de construction à l'échelle du Golfe.

Si à ce stade de l'étude, on ne peut pas comparer les volumes de roches avec d'autres sites similaires, il est un fait que Delphes présente une variété de roches qui n'a été retrouvée nul par ailleurs. Mais c'est surtout une diversité des faciès locaux et les faciès allochtones, grès, calcaires durs et marbres compris, correspondent à 5% du volume mis en œuvre sans la dune oolithique de Corinthe. Cette dernière domine : elle est employée sur plusieurs siècles, mais surtout pour les constructions du VI^e au Ve siècle avant JC (temple d'Apollon, trésors). Au IV^e siècle, uniquement la reconstruction du temple utilise de nouveau cette roche (le reste sont des remplois du temple précédent). L'emploi d'une roche dominante peut indiquer que le choix d'un matériau dépend de la disponibilité : à Delphes, la reconstruction du temple d'Apollon du IV^e siècle emploie donc une main d'œuvre peut être diversifiée, mais qui travaille avec une pierre connue et employée depuis plusieurs siècles dans le sanctuaire.

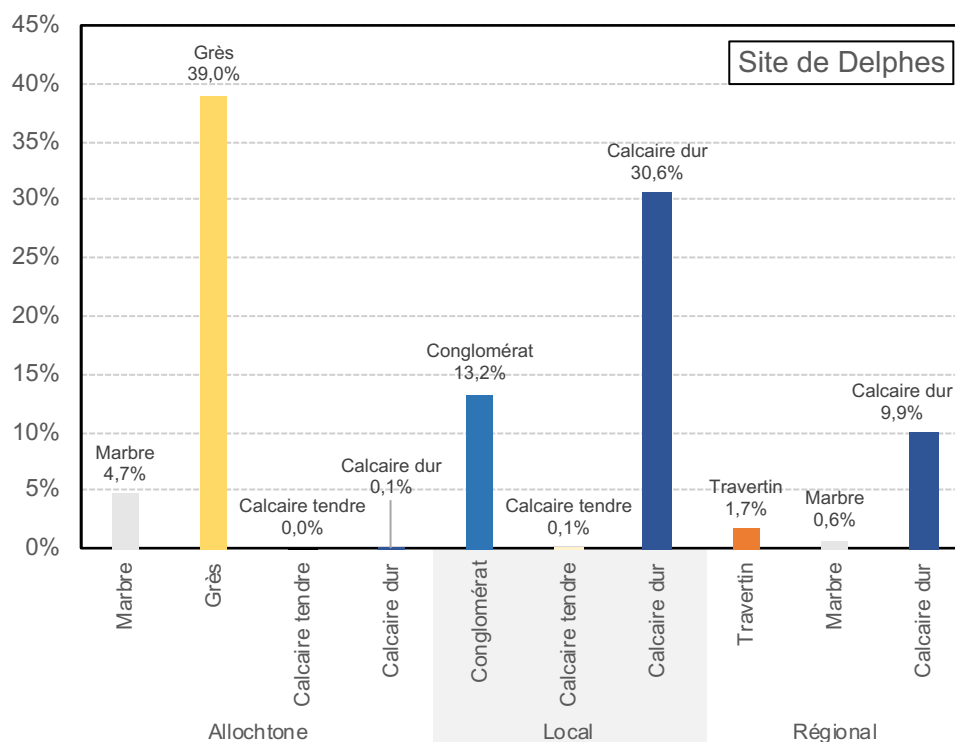


Figure 114. Volumes représentés par chaque classe de roches, à Delphes.

Il faut lire : les marbres allochtones représentent 4,7 % du volume total de roche à Delphes.

6.3 Les échanges de pierres

6.3.1 Les limites d'exportation des pierres

Les pierres de construction peuvent s'étudier du point de vue des sites même (jusqu'où allaient-ils chercher du matériel, quels types de roche sont employées), mais aussi au départ de la carrière. En recoupant nos observations des chapitres 3 et 4, on peut retracer les grandes lignes de l'exportation des pierres calcaires dans la région du Golfe de Corinthe (**Figure 115**). Plusieurs grandes carrières dont la roche a été exportée ont été identifiées :

- Pour les faciès légers, les carrières d'Examilia ([Q16](#)), de Mégare ([Q12](#)) et, dans une moindre mesure, de Kléonai ([Q22](#)). Les carrières d'Égine et du Pirée sont aussi indiquées, même si elles n'ont pas été étudiées dans le cadre de la thèse.

- Pour les faciès durs, les carrières d'Argos ([Q23](#)), de Tanagra ([Q10](#)) et d'Éleusis ([Q25](#)) ont fournis la région en pierres noires, dans des quantités limitées mais des distances potentiellement plus grandes.

Les calcaires noirs sont présentés en violet dans la **Figure 115**, mais les données actuelles ne permettent pas de s'assurer de la provenance exacte des pierres. L'exemple à Delphes (voir [5.4.4](#)), où plusieurs types de calcaires noirs ont été observés sans pouvoir définir d'origine précise, montre les limites de l'approche utilisée : comme les marbres, les caractéristiques macroscopiques ne sont pas suffisantes. Cependant, il semblerait que les carrières de pierres noires soient restreintes et les volumes exportés restreints : ce qui nous permet d'identifier l'origine allochtone généralement.

La carrière qui semble avoir produit des pierres à une grande échelle est la carrière d'Examilia, près de Corinthe, qui exporte un grès : c'est la **dune oolithique**, qu'on peut appeler aussi dune oolithique de Corinthe. Son exportation semble délimitée par les autres centres carriers, et donc orientée vers l'ouest :

- Au sud, les carrières de Kléonai semblent remplacer la pierre de Corinthe, puisqu'on ne la trouve pas à Argos ni à l'Héraion. Elle apparaît cependant à Épidaure : mais c'est un sanctuaire panhellénique, qui présente donc un schéma d'importation particulier.
- A l'est, les carrières d'Égine (et du Pirée ?) semblent avoir fournies les sites ouverts sur le Golfe Saronique : Trézène, Kalaurie, et Athènes (Kouzeli & Dimou 2009), où la dune oolithique de Corinthe n'apparaît pas.
- Au nord, la limite est peut-être définie par la topographie (région montagneuse), ou l'existence d'un faciès régional (voir dans la partie suivante). Le dune oolithique de Corinthe se retrouve cependant à Delphes, mais pas clairement en Béotie.
- A l'ouest, la limite n'a pu être définie, mais un faciès similaire a été trouvé à Kalydon ([site n°34](#)) et Pleuron ([site n°35](#)).



Figure 115. Les échanges de pierres dans le Golfe de Corinthe.

1 (rouge) : les carrières d'Examilia, 2 (bleu) : les carrières de Mégare, 3 (jaune) : les carrières de Kléonai, 4 (violet) : les carrières d'Argos, 5 (violet) : les carrières de Tanagra, 6 (violet) les carrières d'Éleusis, 7 (vert) : les carrières d'Égine. Les points pleins marquent des provenances assurées, les cercles vides des provenances hypothétiques. Les échanges de marbres ne sont pas indiqués. Les flèches indiquent le sens d'exportation privilégié des carrières. Les ellipses marquent l'utilisation régionale, et les traits pleins les limites avérées d'exportation.

Les limites d'exportation de la carrière de Mégare (bleue, n°2) ne sont pas identifiées car on retrouve potentiellement ce faciès à l'est et à l'ouest : de Trézène ([site n°32](#)), Kalaurie ([site n°33](#)), à Delphes (5.4.3), peut-être à Kreusis ([site n°7](#)) et au Kabirion ([site n°13](#)). Cependant, cette hypothèse ne se base que sur des critères macroscopiques et le fait que les carrières de Mégare soient considérées, même dans l'Antiquité, comme la seule région ayant fournis ce calcaire coquillier caractéristique. Cela nécessiterait des confirmations, mais c'est en effet une région ouverte sur les deux golfes, le Golfe de Corinthe et le Golfe Saronique, qui aurait pu fournir facilement la roche. Les carrières de Corinthe sont aussi ouvertes sur les deux Golfes, grâce aux ports de Léchaion et de Kenchrées : pourtant, on ne retrouve pas de grès de Corinthe à l'est à priori. Une hypothèse est qu'elle rentre en concurrence avec les pierres d'Égine, qui sont d'un faciès léger similaire (« pôros ») d'après la littérature (Kokkorou-Alevra *et al.* 2014).

Si les carrières locales sont majoritairement des carrières de calcaires durs et de conglomérats, les carrières dont la roche est exportée restent minoritaires, et concernent uniquement des faciès légers (grès fin, calcaire coquillier) ou des calcaires de couleurs (Argos).

Les carrières locales sont en général bien identifiées lorsqu'un site fait l'objet d'une étude approfondie. De même, les grandes carrières sont connues (si ce n'est étudiées). On peut se poser la question sur les carrières dont la roche est utilisée à une échelle régionale : sont-elles sous-estimées, ou inexistantes ?

6.3.2 La provenance : locale ou régionale ?

Les provenances sont déterminées sur des critères majoritairement géologiques, puis topographiques, parfois archéologiques : elles devront être confirmées par des analyses archéométriques (sur les blocs et sur les carrières). On remarque une dichotomie sur l'étude des pierres calcaires : soit les carrières sont étudiées, soit les sites, mais rarement les deux en même temps, ce qui empêche de voir des motifs régionaux. On peut donc faire l'hypothèse d'une sous-estimation des faciès régionaux en général : en particulier, pour les formations géologiques restreintes, comme les travertins.

Les travertins de Trézène ([site n°32](#)) et de Phénéos ([site n°28](#)) sont considérés locaux, car ce sont des formations qui peuvent se former dans l'environnement immédiat du site

(environnement karstique). Mais cela reste une hypothèse : il faudrait faire une prospection locale, puisque nous avons montré que les carrières se trouvent distantes de 5 kilomètres au maximum du site d'emploi, avec une grande majorité dans le premier kilomètre (voir en [4.4](#), **Figure 82**).

Il faut ensuite prendre en compte la topographie : le travertin de Delphes est considéré régional (voir [5.3.1](#)) : elle se situe qu'à 2 km du site, mais avec un dénivelé positif de 400 mètres. Cependant, Delphes se situe dans un milieu montagneux, alors que Phénéos et Trézène sont dans une plaine : les faciès considérés comme locaux se trouvent dans un périmètre plus grand. De même, les sites sur la côte ont un accès aux ressources importées plus facilement, et les îles sont aussi un cas à part. De ce fait, la définition des faciès locaux, régionaux et allochtone est dépendante du site étudié, et nécessiterait une étude plus approfondie de chaque site.

D'autres arguments, liés à l'utilisation d'une roche dans plusieurs sites archéologiques, sont pris en compte pour l'identification des faciès régionaux. Par exemple, nous avons vu que des grès fins avec des clastes plus ou moins gros, ont été observés à Livadia ([site n°19](#)), Thèbes ([site n°12](#)), au Ptoion ([site n°15](#)), au Kabirion ([site n°13](#)), à Mavrovouni ([site n°9](#)). Leur provenance est pour l'instant non assurée, mais ils ne correspondent pas aux grandes carrières de calcaires du Golfe.

On peut donc émettre l'hypothèse qu'il existe une source de grès béotien qui aurait fourni la région en matériau. Cette hypothèse est soutenue aussi par le fait que l'on n'a pas observé, ou très peu, de faciès de dunes oolithiques de Corinthe au nord-est du Golfe : un faciès régional, avec des propriétés physiques similaires, pourrait avoir été en concurrence et privilégié, comme cela semble se passer avec Kléonai, dans le sud (voir en la **Figure 115**).

D'autres arguments peuvent soutenir notre hypothèse. Si le grès de Corinthe semble avoir été employé au Val des Muses et à Mavrovouni, un second « pòros » a été documenté systématiquement. Des faciès de « grès » existent dans la région, et certains ont été exploités : des carrières ont été identifiées près de Tanagra (Fossey 1991), ainsi qu'à côté du Ptoion (Q7). Très minoritaires, des sculptures en « pòros » ont été retrouvées : quelques Kouroi du Ptoion (Ducat 1971) et des trépieds (Guillon 1943). Ils ne sont pas accessibles et nous n'avons pas pu confirmer leur nature. L'existence d'une autre ressource locale, le « marbre gris béotien », employé uniquement dans la région, joue en faveur de cette hypothèse : un réseau d'échange existe déjà. De plus, la Béotie est aussi une région dont l'histoire est marquée par son isolement

par rapport à ses voisines (Attique, Phocide) : un emploi de matériaux locaux ne serait pas aberrant.

Enfin, il reste cependant difficile de départager l'hypothèse d'une carrière régionale unique, ou de plusieurs petites carrières locales. Uniquement une prospection systématique autour des sites permettrait de les identifier. Si les carrières régionales n'existent pas, ou sont limitées à quelques sites et des projets particuliers (comme la reconstruction du temple à Delphes et l'ouverture des carrières de Saint-Élie), cela signifie que l'importation de pierres est bipolaire et serait dictée par l'ouverture de grandes carrières : on exploite les ressources locales, et on va chercher les roches qu'il nous faut dans de grands centres carriers déjà connus.

6.4 Le choix des roches

6.4.1 Comparaison des propriétés physiques et de l'utilisation

Les résultats des mesures en laboratoire sont présentés en [4.4](#). Il faut mettre en parallèle les principales caractéristiques physiques des roches et leurs utilisations dans la construction pour pouvoir déterminer si une réflexion géotechnique apparaît derrière ces choix.

Les faciès denses, non poreux ni perméables, avec un comportement cassant, sont les plus utilisés pour la construction dans la région du Golfe. Les calcaires durs sont presque uniquement locaux, et les rares exportations concernent des petits volumes de pierres sombres.

A Delphes, le calcaire régional de Saint-Élie, de type *mudstone* avec des joints stylolithiques, est taillé et posé systématiquement en lit de carrières, c'est-à-dire que les stylolithes sont horizontaux. Si cela peut être interprété comme une volonté d'isoler l'élévation des remontées capillaires – ce qui est le cas, puisque la perméabilité de ces roches est restreinte aux fractures – c'est aussi un choix pratique : ce faciès est beaucoup trop lourd pour être employé en élévation, et la roche se découpe plus facilement dans ce sens. Le trésor de Thèbes (SD 124) et le temple en calcaire (SD 44) sont les seules autres constructions monumentales qui emploient du calcaire de Saint-Élie en élévation, mais ils sont de taille plus restreinte.

De même, en tant que matériau de construction, les marbres ont des propriétés similaires (densité, porosité, perméabilité) mais sont exploités et transportés à grande échelle, dans des quantités aussi restreintes (5% à Delphes). Quelles différences existent-ils entre un calcaire dense et un marbre dans la construction ? L'utilisation de l'un ou de l'autre semble

contrainte par sa présence localement : cela sous-entend que le choix ne découlerait pas des propriétés des roches, mais plutôt de leurs propriétés esthétiques et de leurs coûts, en plus de la disponibilité.

De même, les conglomérats, par leur hétérogénéité, ont un comportement variable et une durabilité moins grande. S'ils sont globalement plus légers que les calcaires denses, et sûrement plus perméables en fonction de la matrice, ils ne sont pourtant pas préférés aux calcaires durs dans la construction : ils sont aussi employés quand ils sont disponibles.

Cependant, des faciès légers (grès, calcaire tendre, travertin) semblent avoir été recherchés et aux vues de leurs propriétés physiques : on peut émettre des hypothèses géotechniques sur ces choix.

En particulier, un grès se différencie des autres : la dune oolithique. Elle présente la densité moyenne la plus basse (1,5) et une porosité très élevée (40%). C'est un faciès extrêmement homogène en termes de minéralogie et de texture, à l'échelle du bloc, contrairement aux autres faciès. Si le stromatolithe est homogène en termes de composition, sa structure est grossière et son réseau poreux hétérogène. Le grès de Kenchrées se présente comme un faciès similaire à celui de Corinthe, mais il présente une plus grande hétérogénéité pétrographique. Or, le principal facteur contribuant à l'altération des roches sédimentaires utilisées comme matériau de construction seraient les hétérogénéités minéralogiques et texturales (Benavente et al., 2008).

La dune présente un réseau unimodal avec une classe de seuil de pore autour de $54 \mu\text{m}$ et une distribution de taille de grains homogène autour de $200 \mu\text{m}$. D'après (Bourgès *et al.* 2008), les grains entre 80 et $400 \mu\text{m}$ ont un rôle spécifique dans les grès : ils remplissent l'espace entre les grains les plus gros, et donc les tailles de pores compris entre $0,1$ et $5 \mu\text{m}$ se réduisent. On observe cependant un comportement différent dans la dune, qui est lié à la forme des grains : les grains sont ronds, donc les contacts sont réduits, ce qui augmente la taille des pores. Ainsi, les pores supérieurs à $5 \mu\text{m}$ représentent 70% de la porosité totale, et les pores compris entre $0,1$ et $5 \mu\text{m}$ sont minoritaires. Or, ce sont les micropores qui sont responsables de la capillarité et de la condensation de l'humidité atmosphérique (Andriani & Walsh 2003). Les analyses de porosimétrie au mercure ont aussi montré que les seuils des pores étaient plus petits que les pores même. La dune présente une macro-porosité qui doit augmenter les propriétés de transfert d'eau de la roche, aussi bien dans l'imbibition que l'évaporation, sans coincer le fluide à l'intérieur du réseau poreux.

Il ne faut pas cependant extrapoler ces résultats directement à la construction grecque : le dune oolithique de Corinthe, comme la majorité des faciès calcaires légers, était stuqué : recouvert d'une couche d'enduit. Il n'était donc pas à l'air libre.

Le fait que la dune oolithique soit prédominante à Delphes, employée des fondations à l'élévation, et beaucoup en remploi, pour des constructions variées dont les dédicants sont aussi d'origine variée, semble indiquer que la nature de la roche n'était peut-être pas le facteur le plus important. Cela serait cohérent avec ce que nous venons de montrer sur les carrières régionales.

6.4.2 Nouveau protocole d'analyse des pierres

Le protocole pour l'étude des propriétés géotechniques des roches, appliqué dans la thèse se concentrait sur le comportement des roches mises en œuvre (4.3.1). Nous avons vu que les résultats étaient peu concluants, mais ils concernaient la comparaison des roches lourdes et des roches légères. Notre hypothèse de départ s'était basée sur le cas de Delphes, où une grande diversité de roches dures locales et de roches légères allochtones avait été observée. Or, nous venons de montrer que Delphes apparaît comme une exception : le schéma d'importation de roche est différent de celui de la majorité des sites archéologiques du Golfe, même les sanctuaires (6.2.2). Aux vues de nos interprétations, basées sur l'utilisation des pierres et les échanges de pierres, il serait plus pertinent de comparer entre eux les faciès légers, mais surtout de se concentrer sur d'autres propriétés de la roche, dès la carrière.

L'importation presque systématique de roches légères est un fait, ainsi que la préférence pour le grès de Corinthe. La chaîne opératoire entre l'extraction et la mise en œuvre est longue (**Figure 116**) : extraction (taille), transport à terre ou en mer, puis mise en œuvre (taille et sculpture). On ne peut pas savoir si, lors d'une commande de pierres, la carrière d'origine ou leur nature étaient précisées. Le choix de la roche a peut-être lieu avant même qu'elle soit transportée : les Anciens ont employé d'abord les faciès dont il était possible d'extraire les blocs voulus. Il faudrait alors pouvoir estimer la capacité d'extraction d'une roche : la découpe (fracturation, propagation d'une fissure, anisotropie), la capacité à être taillée (polie ou aplanie), et la rentabilité (perte de matière entre le volume extrait et le volume définitif du bloc). Très peu de littératures existent sur ces points, ou elle se concentre sur les marbres, dont l'extraction est difficile (Kozelj 1988b; Korrès 1995, 2000) : pour les carrières du Pentélique, Korrès (2000) estime un facteur 3 de perte (4200 m³ enlevés pour 1400 m³ de marbre utilisable).

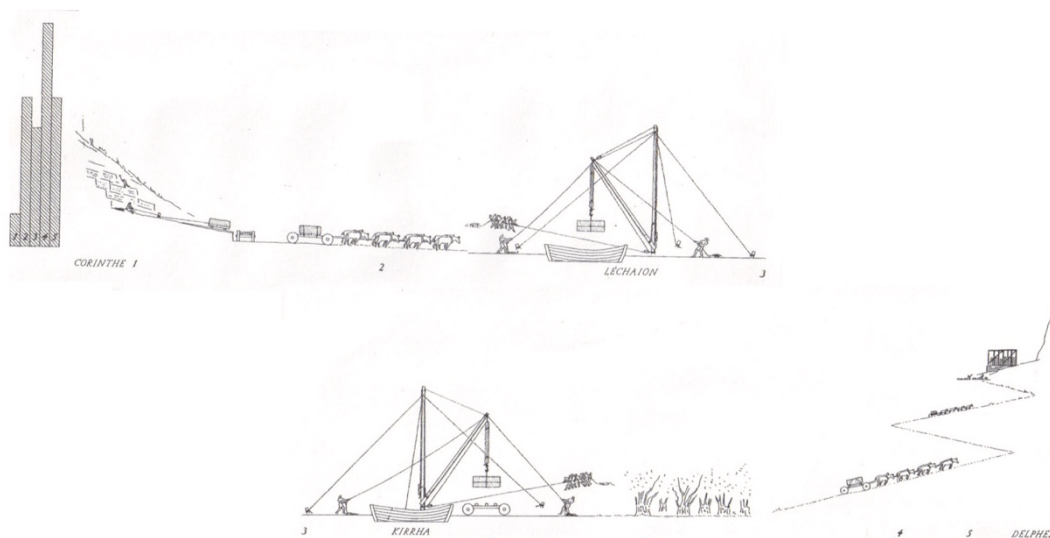


Figure 116. Le transport de pierre : exemple de Corinthe à Delphes (modifié d'après Amandry et Hansen, 2010).

De ces résultats, on peut donc proposer un autre protocole d'étude qui pourrait nous apporter plus d'informations sur les pierres calcaires. Sans regarder les autres facteurs comme l'esthétisme et le coût, l'utilisation des pierres calcaires dans un monument semble dictée surtout par la densité. Mais c'est l'extraction d'une roche et donc sa disponibilité qui semble conditionner sa présence sur le marché de la pierre. C'est donc les carrières même qu'il faut étudier : le module exploitable, lié à l'hétérogénéité de la roche (fracturation...).

Il ne semble pas non plus que la résistance soit le critère de choix préférentiel des faciès légers. Il serait donc intéressant de regarder les propriétés des roches sur le long terme (durabilité) :

- Les mesures de ténacité devraient être continuées, en les couplant avec des mesures d'usure (comme l'abrasion), sec et saturé : pour déterminer un pourcentage de perte lors de l'extraction, et l'influence de l'eau (la roche dans le sol présente un pourcentage d'humidité plus élevé).
- Des mesures d'altération (cycle séchage/mouillage, gel/dégel et cristallisation du sel), avec ou sans stuc, des faciès légers : si aujourd'hui les roches nous apparaissent souvent dégradées, les constructeurs grecs, surtout dans les sanctuaires, construisaient dans la durée. Il est donc difficilement envisageable qu'une pierre qui s'altère beaucoup ait été employée sur le long terme, en particulier la dune oolithique. On peut émettre l'hypothèse

d'une résistance sur le long terme supérieure à celle des autres faciès, quand elle est stuquée.

- Des mesures de compaction et de déformabilité, en observant les modifications sur le réseau poreux : nous avons vu que la dune oolithique avait un comportement presque ductile, qu'il serait intéressant de mieux comprendre. Mis en relation avec l'utilisation dans les monuments (colonnes, murs...), cela semble être une des pistes restantes pour comprendre la domination de la dune oolithique dans le Golfe. En particulier, dans une zone aussi sismique que Delphes (glissement de terrain, eaux souterraines...), le choix d'une roche légère et déformable était peut-être réfléchi.

L'étude des carrières permettra surtout d'identifier les faciès précis exploités, et de trouver des critères déterminants pour affirmer nos hypothèses d'origine (lien site – carrière). Par définition, les roches sédimentaires présentent une grande variabilité et sans une étude pertinente des carrières, nos provenances ne resteront qu'hypothétiques. Il faut aussi garder en tête les limitations liées au travail en contexte archéologique : les échantillons sont réduits au strict minimum sur site. Cette étape est donc primordiale : une fois la provenance assurée, il est alors possible d'envisager un échantillonnage plus important à l'affleurement.

Enfin, il faudrait comparer nos roches entre elles, mais aussi avec les autres matériaux de construction. En particulier, la brique crue, matériau plus humble qui n'a pas survécu aux affres du temps, était employée à Delphes, en élévation uniquement, pour des raisons de poids (Laroche & Jacquemin 2001). Or, la dune oolithique de Corinthe présente une densité de 1,5 g/cm³, qui est comparable voire inférieure à celle de la brique crue.

7 Conclusions

7.1 Synthèse

Ce travail avait pour but de répondre aux trois problématiques suivantes, pour la construction monumentale dans la région du Golfe de Corinthe entre le VIIe et le Ier siècle avant JC : **Quelles sont les pierres employées ? D'où proviennent ces pierres ? Pourquoi sont-elles utilisées ?**

Au total, 37 sites archéologiques et 25 carrières ont été étudiés, sur une zone de plus de 10 000 km². Chaque type de pierre a été documenté sur site, et catégorisé selon une classification des matériaux de construction. Des estimations volumétriques ont été réalisées sur les vestiges en place et d'après la littérature. Les carrières ont été identifiées et les roches décrites ; six d'entre elles ont subi un protocole d'analyses en laboratoire. Le site de Delphes a fait l'objet d'une étude plus approfondie sur l'utilisation des pierres dans les monuments et l'évolution dans le temps.

Avant de reprendre les conclusions, il est important de revenir sur quelques points de méthodologie. Premièrement, notre approche ne se base que sur des données de terrain et les vestiges matériels : les blocs de construction. Ils sont par définition parcellaires : certains vestiges n'ont jamais été retrouvés (par exemple, la ville d'Élis, alors la plus importante de la région), disparus depuis leur découverte (temple de Thespies, de Platées), ou inaccessibles dans le cadre de la thèse. Si la diversité des faciès a été considérée sur les blocs en place, les blocs non en place ont aussi été comptés dans un souci d'exhaustivité. Cependant, quand les blocs étaient encore présents sur le site, nous nous sommes basés sur la littérature et leur attribution à un monument n'a pas été vérifiée.

Certaines régions sont plus pauvres en sites archéologiques que d'autres, par exemple à l'ouest, ce qui limite la comparaison à grande échelle. En particulier pour Delphes, sanctuaire panhellénique isolé, sur la marge nord, en milieu montagneux, il aurait été crucial d'étudier des sites similaires. De même, le choix des sites visités était dicté par un besoin de représentativité, mais l'étude nécessiterait d'être complétée (Chéronée, Onchestos, Eléon en Béotie ; Oenoe, Mégare même ; Titane, Ténéa...). En particulier, une analyse plus poussée d'Épidaure et d'Olympie pourrait fournir des informations sur les échanges de pierres dans les sanctuaires.

On trouve à Olympie, par exemple, un trésor archaïque de Sicyone, dont le grès est considéré comme provenant de Sicyone (Doerpfeld, 1883), et un trésor classique dit des Mégariens, comme à Delphes.

Enfin, Delphes est le seul site où une approche temporelle a pu être menée : on a observé des variations au cours du temps de l'utilisation des pierres. A l'échelle du Golfe, le filtre du temps n'a pas été étudié, alors que de nombreux sites présentent une histoire complexe (Aliarte est rasée par les Perses, en 480 avant JC ; Corinthe par les Romains en 146 ; la ville basse de Sicyone, en 303).

Un dernier point doit être soulevé : l'étude proposée ici se concentre sur la pierre calcaire employée dans le bâti. Cependant, les marbres ont été tout de même pris en compte. A Delphes, au moins 4 types différents ont été comptabilisés : c'est une diversité non négligeable. Au Ptoion, au moins 3 marbres blancs différents semblent avoir été employés dans la sculpture (Ducat 1971). Au contraire, la sculpture en calcaire, si elle reste minoritaire, est ici ignorée (alors qu'on l'observe à Delphes : sculpture du temple en tuf, métopes du trésor de Sicyone). Ce choix découle de raisons scientifiques et pratiques : si nous ne voulions pas perdre d'informations sur les réseaux d'échanges de pierres (en ignorant les marbres), la sculpture en calcaire n'a jamais été étudiée systématiquement, encore moins du point de vue du matériau, et les objets ne sont pas accessibles car fragiles.

Sur la **nature des roches** employée dans la construction, on observe une dominance des faciès locaux, influencée par la position géographique et donc les ressources disponibles : aussi bien pour les roches denses (calcaires durs et conglomérats), que les faciès légers (grès et travertins). Le marbre est absent de la construction, à l'exception de Delphes. La renommée d'un site influe sur la diversité des faciès allochtones, et des volumes associés. Cependant, on observe rarement une exploitation des pierres régionales, sauf à Delphes et à Épidaure : soit elles ne sont pas connues, soit elles n'existent pas, aux bénéfices de grandes carrières d'exportation, connues et dont la pierre est exportée sur le long terme.

Dans tous les cas, ce sont les faciès légers qui représentent les principaux **échanges de pierres** à l'échelle du Golfe, accompagnés ensuite par des calcaires durs de couleur sombre et les marbres blancs. Si 90% du volume de roche provient du premier kilomètre autour du site, certains faciès peuvent faire plusieurs dizaines de kilomètres mais le volume employé est réduit. L'exportation de la dune oolithique de Corinthe, par contre dans un volume conséquent, domine

plutôt l'ouest du Corinthe, les régions accessibles aussi : son exportation semble être délimitée par la présence d'autres carrières avec des propriétés similaires.

Enfin, la méthodologie appliquée et l'approche réalisée en laboratoire ne permet pas de répondre clairement à la question du **choix des pierres** : si les constructeurs grecs avaient une conscience géotechnique de la roche, reste une question ouverte. Ils exploitaient d'abord les pierres locales indépendamment leurs qualités, mais allaient chercher les pierres légères dont ils avaient besoin, pour des bâtiments particuliers (temples). Ainsi, il semblerait que la densité faisait partie des raisons prépondérantes dans le choix de matériau, sans doute au même niveau que l'esthétisme ou le coût.

7.2 Perspectives

Ce travail a permis d'établir les hypothèses de base pour la provenance des roches sur l'ensemble des sites étudiés, et de définir les limites d'exportation de grands centres carriers dans la région du Golfe de Corinthe. Ces hypothèses restent à confirmer par une approche archéométrique, puisqu'elles se basent sur des critères macroscopiques uniquement, avec une attention particulière sur les grès fins et les calcaires de couleurs.

Appliquer la méthodologie à d'autres sites archéologiques est la suite naturelle, ainsi que continuer la prospection géologique des carrières, pour compléter les données regroupées dans cette thèse. La collaboration avec des spécialistes d'autres domaines est aussi nécessaire pour mettre en perspectives les données géologiques (nature et origine des roches) avec l'histoire des sites, les techniques de construction (outils de taille, crampons, mise en œuvre), l'exploitation des carrières (traces, estimation de volume, module des blocs extrait) et l'utilisation en sculpture (style, datation...) par exemple.

J'ai pu définir 4 axes de recherches qui seraient dans la continuité de ces travaux de thèse. Ils n'ont pas tous la même échelle mais me semblent pertinents, je les présente succinctement ci-dessous.

Projet 1 : L'étude géologique et archéologique des grandes carrières de calcaires. Les carrières de Corinthe, dont celles d'Examilia et d'Isthmia, les carrières de Kléonai, de Mégare, celles d'Égine et du Pirée sont toutes très proches et n'ont pas fourni les mêmes sites, de la même façon. Les faciès extraits sont similaires (roches sédimentaires légères, détritiques ou biogéniques) et les volumes importants : elles peuvent entrer en concurrence. Mieux définir les

roches extraites de chaque carrière permettrait d'identifier les échanges et les limites d'exportation. Enfin, ce sont aussi des carrières en danger, qui se dégradent très rapidement par la nature de la roche mais aussi par l'action humaine, faute de mise en valeur.

Projet 2 : **La pierre dans les sanctuaires**. Une étude plus poussée des sanctuaires d'Olympie et d'Épidaure, pourrait confirmer ou infirmer notre hypothèse sur Delphes, qui apparaît comme une exception dans l'utilisation des ressources régionales et allochtones. Épidaure se trouve dans un contexte géographique et géologique plus ou moins similaire à Delphes, isolé, et Olympie possède une renommée, peut être non égale, mais semblable à celle de Delphes. Cela permettrait de mieux comprendre la construction sacrée du point de vue de la pierre, un aspect de la construction antique où nous possédons le plus de sources autres pour pouvoir travailler.

Projet 3 : **Les calcaires noirs**. Peu utilisés en termes de volume, limités à des bases et des plaquages, qui peuvent se polir, ils sont très souvent importés : les calcaires noirs sont les nouveaux *marbres*. Certaines carrières sont déjà identifiées : Argos, Tanagra, Éleusis, le Cap Ténare, Chios et elles exploitent des unités géologiques restreintes. Mieux caractériser la roche extraite et déterminer des critères diagnostiques pour retrouver la provenance permettraient de suivre un réseau parallèle à celui des marbres blancs. En particulier, les roches extraites semblent avoir des âges différents : une datation, qui nécessite quelques grammes de poudre, peut être envisagée.

Projet 4 : **La Béotie et ses ressources régionales**. En plus du « marbre béotien », qui aurait besoin d'une définition plus précise, la Béotie apparaît comme une zone idéale pour déterminer les échanges de pierres à l'échelle d'une région. Si l'hypothèse d'une carrière régionale se confirme, cela permettra d'appréhender la concurrence entre les roches des régions environnantes.

Bibliographie

- ABU-JABER, N., BLOXAM, E., DEGRYSE, P. & HELDAL, T. 2009. *QuarryScapes: Ancient Stone Quarry Landscapes in the Eastern Mediterranean*. Geological Survey of Norway.
- AGAIBY, S.W., EL-GHAMRAWY, M.K. & AHMED, S.M. 2013. Learning from the Past: The Ancient Egyptians and Geotechnical Engineering. In: Fourth International Seminar on Forensic Geotechnical Engineering. Bangalore, India.
- ALCOCK, S.E. 1991. Urban Survey and the Polis of Phlius. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 60(4), 421–463.
- AMANDRY, P. 1953. *La Colonne Des Naxiens et Le Portique Des Athéniens*. 128 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Topographie et architecture, 6.
- AMANDRY, P. 1981. Chronique delphique. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 105(2), 673–769.
- AMANDRY, P. & HANSEN, E. 2010. *Le temple d'Apollon du IVe siècle*. 512 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Topographie et architecture, 14.
- AMANDRY, P. & SPYROPOULOS, T. 1974. Monuments chorégiques d'Orchomène de Béotie. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 98(1), 171–246.
- ANDERSON-STOJANOVIĆ, V.R. 1996. The University of Chicago Excavations in the Rachi Settlement at Isthmia, 1989. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 65(1), 57–98.
- ANDREWS, J.E., PORTMAN, C., ROWE, P.J., LEEDER, M.R. & KRAMERS, J.D. 2007. Sub-orbital sea-level change in early MIS 5e: New evidence from the Gulf of Corinth, Greece. *Earth and Planetary Science Letters* 259(3), 457–468.
- ANDRIANI, G. & WALSH, N. 2003. Fabric, porosity and water permeability of calcarenites from Apulia (SE Italy) used as building and ornamental stone. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 62(1), 77–84.
- ARMIJO, R., MEYER, B., KING, G.C.P., RIGO, A. & PAPANASTASSIOU, D. 1996. Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean. *Geophysical Journal International* 126(1), 11–53.

- ARMIJO, R., MEYER, B., HUBERT, A. & BARKA, A. 1999. Westward propagation of the North Anatolian fault into the northern Aegean: Timing and kinematics. *Geology* 27(3), 267–270.
- AUBOUIN, J. 1959. *Contribution à l'étude géologique de la Grèce Septentrionale : les confins de l'Épire et de la Thessalie*. Thèse de doctorat, 525 pp.
- AUDIAT, J. 1933. *Le Trésor Des Athéniens*. 109 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Topographie et architecture, 4.
- AURIGNY, H., BRAUNSTEIN, D. & MARTINEZ, J.-L. 2016. Sculptures de Delphes. *Bulletin de correspondance hellénique* 139–140(2), 784–794.
- AUSTIN, R.P. 1926. Excavations at Haliartos, 1926. *Annual of the British School at Athens* 27, 81–91.
- AUSTIN, R.P. 1927. Excavations at Haliartos, 1927. *Annual of the British School at Athens* 28, 128–140.
- AUSTIN, R.P. 1932. Excavations at Haliartos, 1931. *Annual of the British School at Athens* 32, 180–212.
- BAKHUIZEN, S.C. & GORITSA TEAM. 1992. *A Greek City of the Fourth Century B.C.* 404 pp. 'L'Erma' di Bretschneider.
- BARBA, L., BLANCAS, J., MANZANILLA, L.R., ORTIZ, A., BARCA, D., CRISCI, G.M., MIRIELLO, D. & PECCI, A. 2009. Provenance of the Limestone used in Teotihuacan (Mexico): A Methodological Approach. *Archaeometry* 51(4), 525–545.
- BECK, H. & SMITH, P. 2018. *Megarian Moments. The Local World of an Ancient Greek City-State*. McGill University Library and Archives. 292 pp. Montreal, QC, Teiresias Supplements Online.
- BECK, K. 2006. *Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- BENAVENTE, D., GARCÍA DEL CURA, M.A., FORT, R. & ORDOÑEZ, S. 2004. Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* 74(1), 113–127.
- BENAVENTE, D., CULTRONE, G. & GÓMEZ-HERAS, M. 2008. The combined influence of

- mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy* 20(4), 673–685.
- BENTHAM, P., COLLIER, R.E., GAWTHORPE, R.L., LEEDER, R. & STARK, C. 1991. Tectono-sedimentary development of an extensional basin: the Neogene Megara Basin, Greece. *Journal of the Geological Society* 148(5), 923–934.
- BERNARD, P., LYON-CAEN, H., BRIOLE, P., DESCHAMPS, A., BOUDIN, F., MAKROPOULOS, K., PAPADIMITRIOU, P., LEMEILLE, F., PATAU, G., BILLIRIS, H., PARADISSIS, D., PAPAZISSI, K., CASTARÈDE, H., CHARADE, O., NERCESSIAN, A., AVALLONE, A., PACCHIANI, F., ZAHRADNIK, J., SACKS, S. & LINDE, A. 2006. Seismicity, deformation and seismic hazard in the western rift of Corinth: New insights from the Corinth Rift Laboratory (CRL). *Tectonophysics* 426(1–2), 7–30.
- BESSAC, J.-C. 1986. *L'Outillage traditionnel du tailleur de pierre, de l'Antiquité à nos jours*. C.N.R.S. Supplément 14 de la Revue archéologique de Narbonnaise.
- BESSAC, J.-C. & SABLAYROLLES, R. 2002. Problématique archéologique des carrières antiques en Gaule. *Gallia* 59(1), 3–9.
- BIANCO, L. 2017. Techniques to Determine the Provenance of Limestone Used in Neolithic Architecture of Malta. *Romanian Journal of Physics* 62(1–2), p.10.
- BIANCO, L. 2019. A geohistorical retrospective analysis of cultural heritage buildings: the case of Mosta Dome, Malta. *GeoJournal* 84(2), 291–302.
- BIARD, G., KALLIONTZIS, Y. & CHARAMI, A. 2017. La base des Muses au sanctuaire de l'Hélicon. *Bulletin de correspondance hellénique* 141(2), 697–752.
- BIERS, W.R. 1971. Excavations at Phlius, 1970. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 40(4), 424–447.
- BIERS, W.R. 1973. Excavations at Phlius, 1972. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 42(1), 102–120.
- BIERS, W.R. 1975. The Theater at Phlius: Excavations 1973. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 44(1), 51–68.
- BILLOT, M.-F. 1997. Recherches archéologiques récentes à l'Héraion d'Argos. In: La Genière, J. de (ed.) *Héra. Images, espaces, cultes : Actes du Colloque International du Centre de Recherches Archéologiques de l'Université de Lille III et de l'Association P.R.A.C. Lille*,

- 29-30 novembre 1993. Publications du Centre Jean Bérard, Naples, Collection du Centre Jean Bérard, 11–56.
- BIRGE, D.E., KRAYNAK, L.H. & MILLER, S.G. 1992. *Excavations at Nemea I. Topographical and Architectural Studies: The Sacred Square, the Xenon, and the Bath*. 319 pp. University of California Press, Berkeley Los Angeles Oxford, Nemea.
- BLÜMNER, H. 1884. *Technologie Und Terminologie Der Gewerbe Und Künste Bei Griechen Und Römern*. BG Teubner, Leipzig, 3.
- BOMMELAER, J.-F. & LAROCHE, D. 2016. *Guide de Delphes. Le Site*. 2e édition. 332 pp. Ecole Française d'Athènes, Sites et monuments.
- BORNOVAS, J. 1984. *Geological Map of Greece, Kaparellion Sheet*. IGME, Athens.
- BORNOVAS, J., LALECHOS, N. & FILIPPAKIS, N. 1972. *Geological map of Greece, Korinthos sheet*. IGME, Athens.
- BORNOVAS, J., GAITANAKIS, P. & SPIRIDOPOULOS, A. 1984. *Geological map of Greece, Perachora sheet*. IGME, Athens.
- BOURGÈS, A., FEHR, SIMON, E. & SNETHALAGE, R. 2008. Correlation between the micro-structure and the macroscopic behavior of sandstones. *Correlation between the micro-structure and the macroscopic behavior of sandstones*.
- BOURGUET, É. 1932. *Les Comptes du IVe siècle*. 354 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Épigraphie., 5.
- BOUSQUET, J. 1942. Delphes. Comptes du IVe siècle. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 66(1), 84–123.
- BOUSQUET, J. 1952. *Le Trésor de Cyrène*. 112 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Topographie et architecture, 8.
- BOUSQUET, J. 1988. *Études sur les comptes de Delphes*. 232 pp. De Boccard, Bibliothèque des Ecoles françaises d'Athènes et de Rome.
- BRILLI, M., ANTONELLI, F., GIUSTINI, F., LAZZARINI, L. & PENSABENE, P. 2010. Black limestones used in antiquity: the petrographic, isotopic and EPR database for provenance determination. *Journal of Archaeological Science* 37(5), 994–1005.

- BRILLI, M., GIUSTINI, F. & KADIOĞLU, M. 2019. Black limestone used in antiquity: recognizing the limestone of Teos. *Archaeometry* 61(2), 282–295.
- BRIOLE, P., RIGO, A., LYON-CAEN, H., RUEGG, J.C., PAPAZISSI, K., MITSAKAKI, C., BALODIMOU, A., VEIS, G., HATZFELD, D. & DESCHAMPS, A. 2000. Active deformation of the Corinth rift, Greece: Results from repeated Global Positioning System surveys between 1990 and 1995. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105(B11), 605–625.
- BRONEER, O. 1973. *Topography and Architecture*. 286 pp. American School of Classical Studies at Athens, Isthmia, II.
- BROOKES, A.C. 1981. Stoneworking in the Geometric Period at Corinth. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 50(3), 285–290.
- BRUN, P. 1997. Du fromage de Kythnos au marbre de Paros : la question des appellations contrôlées (?) dans l'Antiquité grecque. *Revue des Études Anciennes* 99(3), 401–409.
- BURFORD, A. 1960. Heavy Transport in Classical Antiquity. *The Economic History Review* 13(1), 1–18.
- BURFORD, A. 1969. *The Greek Temple Builders at Epidauros: A Social and Economic Study of Building in the Asklepien Sanctuary, during the Fourth and Early Third Centuries B.C.* 294 pp. University of Toronto Press.
- CAMP, J.M. 1991. Notes on the Towers and Borders of Classical Boiotia. *American Journal of Archaeology* 95(2), 193–202.
- CARTER, E.J., ANDREWS, E. & ANDREW, K. 2017. The provenance, petrology and sedimentology of building stone in Bromyard, Herefordshire, UK. *Proceedings of the Geologists' Association* 128(3), 480–499.
- CASKEY, J.L. & AMANDRY, P. 1952. Investigations at the Heraion of Argos, 1949. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 21(3), 165–221.
- CATERINA, B., RUBI, R. & HUBERT-FERRARI, A. 2022. Stratigraphic architecture, sedimentology and structure of the Middle Pleistocene Corinth Canal (Greece). *Geological Society of London Special Publications* 523.
- CELET, P. 1962. *Contribution à l'étude Géologique Du Parnasse - Kiona et d'une Partie Des Régions Méridionales de La Grèce Continentale*. Université de Lille.

- CHARBONNEAUX, J. 1925. *Le Sanctuaire d'Athéna Pronaia. La Tholos*. 36 pp. E. de Boccard, Paris, Fouilles de Delphes. Topographie et architecture, 2.
- CHATZICONSTANTINOY, A. & POUPAKI, R. 2002. The Extraction of Travertine in Antiquity on the Island of Cos, Dodecanese, Greece. *Mediterranean Archaeology & Archaeometry* 2(2), 59–68.
- CHIDIROGLOU, M. 2015. Small Euboean quarries. The local community markets. In: ASMOSIA X. Rome.
- CHIOTIS, E.D., TSOMBOS, P. & PHOTIADES, A. 2012. Ancient quarries of limestone at the Perachora Lake, Loutraki in Greece. In: 5th Conference of the Hellenic Archaeometry Society.
- CHOQUETTE, P.W. & PRAY, L.C. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG bulletin* 54(2), 207–250.
- CHRISTIEN, J. 2014. Les carrières de Laconie : essai de synthèse. *Dialogues d'histoire ancienne* 11(1), 171–191.
- COLLIER, R.E.L. 1988. *Sedimentary Facies Evolution in Continental Fault-Bounded Basins Formed by Crustal Extension: The Corinth Basin, Greece*. Thèse de doctorat, University of Leeds, 369 pp.
- COLLIER, R.E.L. 1990. Eustatic and tectonic controls upon Quaternary coastal sedimentation in the Corinth Basin, Greece. *Journal of the Geological Society* 147(2), 301–314.
- COLLIER, R.E.L. & THOMPSON, J. 1991. Transverse and linear dunes in an Upper Pleistocene marine sequence, Corinth Basin, Greece. *Sedimentology* 38(6), 1021–1040.
- COLLIER, R.E.L., LEEDER, M.R., ROWE, P.J. & ATKINSON, T.C. 1992. Rates of tectonic uplift in the Corinth and Megara Basins, central Greece. *Tectonics* 11(6), 1159–1167.
- DAUX, G. 1959. Chronique des fouilles. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 83(2), 567–793.
- DAVIES, R., ENGLAND, P., PARSONS, B., BILLIRIS, H., PARADISSIS, D. & VEIS, G. 1997. Geodetic strain of Greece in the interval 1892–1992. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102(B11), 571–588.
- DAVIS, G. 2018. *Geologic and Geoarchaeological Mapping of the Sanctuary of Zeus*,

Peloponnesus, Greece. Geological Society of America.

- DE RIDDER, A. 1922. Fouilles de Thespies et de l'Hiéron des Muses de l'Hélicon (P. Jamot : 1888-1889-1890, P. Jamot et A. de Ridder : 1891). Monuments figurés. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 46(1), 217–306.
- DE VALS, M. 2018. *La pierre à Delphes. Axe Géologie*. Rapport de Master, Université Claude Bernard Lyon 1, 49 pp.
- DE VALS, M. 2019. *Etude Préliminaire Sur l'utilisation de La Pierre Dans Le Sanctuaire de Delphes, Grèce. Contexte Géologique et Provenance*. Rapport de Master, Université Claude Bernard Lyon 1, 29 pp.
- DE VALS, M. & MORETTI, I. 2022. Geology and construction: survey of archaeological sites and their natural environments (Gulf of Corinth, Greece). *Comptes Rendus. Géoscience* 354(G1), 51–73.
- DE VALS, M., GASTINEAU, R., PERRIER, A., RUBI, R. & MORETTI, I. 2020. The stones of the Sanctuary of Delphi – Northern shore of the Corinth Gulf – Greece. *BSGF - Earth Sciences Bulletin* 191, 11.
- DEGRYSE, P., MUCHEZ, P., LOOTS, L., VANDEPUT, L. & WAELENS, M. 2003. The building stones of Roman Sagalassos (SW Turkey): Facies analysis and provenance. *Facies* 48(1), 9–22.
- DERCOURT, J., ZONENSHAIN, L.P., RICOU, L.-E., KAZMIN, V.G., LE PICHON, X., KNIPPER, A.L., GRANDJACQUET, C., SBORTSHIKOV, I.M., GEYSSANT, J., LEVRIER, C., PECHERSKY, D.H., BOULIN, J., SIBUET, J.-C., SAVOSTIN, L.A., SOROKHTIN, O., WESTPHAL, M., BAZHENOV, M.L., LAUER, J.P. & BIJU-DUVAL, B. 1986. Geological evolution of the Tethys belt from the Atlantic to the Pamirs since the Lias. *Tectonophysics* 123, 241–315.
- DERMITZAKIS, M., TSILIGAKI, E., STAMATAKIS, M., YPSILANTO, E. & POMONI-PAPAIIOANNOU, F. 2006. The bluish black eleusinian stone; origin, technical features and archaeological data. *Ορυκτός Πλούτος / Mineral Wealth* 139.
- DEROCHE, V., MANDI, V., MANIATIS, Y. & NIKOLAOU, A. 1989. Identification de marbres antiques à Delphes. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 113(1), 403–416.
- DIA, A.N., COHEN, A.S., O'NIONS, R.K. & JACKSON, J.A. 1997. Rates of uplift investigated through ²³⁰Th dating in the Gulf of Corinth (Greece). *Chemical Geology* 138(3), 171–184.

- DIMOU, E., SCHMITT, A. & PELON, O. 2000. Recherches sur les matériaux lithiques utilisés dans la construction du palais de Malia : étude géologique. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 124(2), 435–457.
- DINTER, D.A. 1998. Late Cenozoic extension of the Alpine collisional orogen, northeastern Greece: Origin of the north Aegean basin. *GSA Bulletin* 110(9), 1208–1230.
- DOUNAS, A. 1971. *Geological map of Greece, Erithrai sheet*. IGME, Athens.
- DOUSOS, T., KOUKOUVELAS, I.K. & XYPOLIAS, P. 2006. A new orogenic model for the External Hellenides. *Geological Society, London, Special Publications* 260(1), 507–520.
- DRAGANITS, E. 2009. The archaic sanctuary on Depotiko Island (Cyclades): Geological outline and lithological characterization of the building stones, with their possible provenance. *Austrian Journal of Earth Sciences* 102(1), 91–101.
- DRDÁČK, M., HASNÍKOVÁ, H. & VALACH, J. 2012. Complex Comparative Tests on Historic Stone. *International Journal of Heritage in the Digital Era 1(Supplement)*, 337–341.
- DUCAT, J. 1971. *Les Kouroi du Ptoion : le sanctuaire d'Apollon Ptoieus à l'époque archaïque*. Édition E. de Boccard.
- DUFAURE, J.-J. & ZAMANIS, A. 1979. Un vieux problème géomorphologique : les niveaux bordiers au sud du Golfe de Corinthe. *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 56(464), 341–350.
- DUNHAM, R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures. In: *Classification of Carbonate Rocks - A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir, 108–121.
- DWORAKOWSKA, A. 1975. *Quarries in Ancient Greece*. 212 pp. Zakład Narodowy im. Ossolińskich.
- DYGGVE, E. 1948. *Das Laphrion der Tempelbezirk von Kalydon*. 367 pp. i kommission hos Ejnar Munksgaard, København.
- EL AMRANI, I.-E. & EL AZHARI, H. 2009. Évaluation des propriétés physico-mécaniques des pierres de construction du Maroc à partir des vitesses des ondes P et de la résistance au choc. *Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre* (31), 41–54.
- FACHARD, S. 2013. Eleutherai as the Gates to Boeotia. *Revue des Études Militaires Anciennes*

Pratiques militaires et art de la guerre dans le monde grec antique Études offertes à Pierre Ducrey à l'occasion de son 75e anniversaire (6), 81–106.

FANT, J.C. 2009. Quarrying and Stoneworking. *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World*.

FEYEL, C. 1998. *Les Artisans Dans Les Sanctuaires Grecs Aux Époques Classique et Hellenistique à Travers La Documentation Financière*. Thèse de doctorat, Paris, EPHE.

FEYEL, C. 2007. Le monde du travail à travers les comptes de construction des grands sanctuaires grecs. *Pallas* (74), 77–92.

FIECHTER, E.R. 1931. *Die Theater von Oiniadai Und Neupleuron*. W. Kohlhammer.

FLEURY, J.-J. 1980. *Les Zones de Gavrovo-Tripolitza et Du Pinde-Olonos : Grèce Continentale et Péloponnèse Du Nord Évolution d'une Plate-Forme et d'un Bassin Dans Leur Cadre Alpin*. Thèse de doctorat, Lille 1.

FLÜGEL, E. 1999. Microfacies-based provenance analysis of Roman imperial mosaic and sculpture materials from Bavaria (Southern Germany). *Facies* 41(1), 197–208.

FLÜGEL, E. 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

FORD, M., ROHAIS, S., WILLIAMS, E.A., BOURLANGE, S., JOUSSELIN, D., BACKERT, N. & MALARTRE, F. 2013. Tectono-sedimentary evolution of the western Corinth rift (Central Greece). *Basin Research* 25(1), 3–25.

FORD, M., HEMELSDAËL, R., MANCINI, M. & PALYVOS, N. 2017. Rift migration and lateral propagation: evolution of normal faults and sediment-routing systems of the western Corinth rift (Greece). *Geological Society, London, Special Publications* 439(1), 131–168.

FOSSEY, J. & MORIN, J. 1986. *Khóstia 1983 : rapport préliminaire sur la seconde campagne de fouilles canadiennes à Khostia en Béotie, Grèce Centrale = preliminary report on the second season of canadian excavations, at Khostia Boiotia, Central Greece*. 15 pp. J.C. Gieben ill., Amsterdam, Monographies en archéologie et histoire classiques de l'Université McGill.

FOSSEY, J.M. 1981. *Khostia 1980: A Preliminary Report on the First Season of Canadian Excavations at Khóstia, Boiotia, Central Greece = Khostia 1980 : Rapport Préliminaire Sur La Première Campagne de Fouilles Canadiennes à Khóstia En Béotie, Grèce*

- Centrale*. 129 pp. McGill, Montréal, McGill University monographs in classical archaeology and history.
- FOSSEY, J.M. 1990. *Papers in Boiotian Topography and History*. 279 pp. Brill, Amsterdam.
- FOSSEY, J.M. 1991. *Epigraphica Boeotica I: Studies in Boiotian Inscriptions*. 312 pp. Brill, Amsterdam.
- FUCHS, T. 1877. *Studien über die jüngeren Tertiärbildungen Griechenlands*. 42 pp. Kaiserl.-Königl. Hof- und Staatsdr., Wien.
- FYTIKAS, M., INNOCENTI, F., MANETTI, P., PECCERILLO, A., MAZZUOLI, R. & VILLARI, L. 1984. Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region. *Geological Society, London, Special Publications 17(1)*, 687–699.
- GALETTI, G., LAZZARINI, L. & MAGGETTI, M. 1992. A first characterization of the most important granites used in Antiquity. 167–177.
- GASTINEAU, R. 2017. *Carte Géologique et Caractérisation Lithologique Des Édifices Du Site Archéologique de Delphes, Grèce*. Mémoire de Master, Université Grenoble Alpes, 25 pp.
- GAUTIER, P., BRUN, J.-P., MORICEAU, R., SOKOUTIS, D., MARTINOD, J. & JOLIVET, L. 1999. Timing, kinematics and cause of Aegean extension: a scenario based on a comparison with simple analogue experiments. *Tectonophysics 315(1)*, 31–72.
- GINOUVÈS, R., MARTIN, R., COARELLI, F., COULTON, J.J., GROS, P., GUIMIER-SORBETS, A.-M., HADJIMICHALI, V. & KRAUSE, C. 1985. *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine. Tome I. Matériaux, techniques de construction, techniques et formes du décor*. École Française de Rome.
- GOLDSWORTHY, M., JACKSON, J. & HAINES, J. 2002. The continuity of active fault systems in Greece. *Geophysical Journal International 148(3)*, 596–618.
- GÖTZE, J., SIEDEL, H. & MAGNUS, M. 2007. Provenance determination of building sandstones: a methodology applied to Cretaceous sandstones from Saxony (Germany). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 158(4)*, 807–819.
- GUEST-PAPAMANOLI, A. 1989. Les carrières de grès dunaire à Malia. *Bulletin de Correspondance Hellénique 113(1)*, 113–122.

- GUILLON, P. HELLENISTE. 1943. *Les trépieds du Ptoion*. 63 pp. E. de Boccard, Paris, Bibliothèque des Écoles françaises d'Athènes et de Rome.
- GUILLON, P. 1936. Mesures de longueur à Akraiphia d'après le plan du temple supérieur de Castraki (Ptoion). *Bulletin de Correspondance Hellénique* 60(1), 3–10.
- HAGERMAN, C., MUNARETTO, M. & GARVIE-LOK, S.J. 2014. *Stymphalos : The Acropolis Sanctuary*. Schaus, G.P. (ed.). 499 pp. University of Toronto Press, Publication of the Canadian Archaeological Institute at Athens ; 7.
- HANSEN, E. 2000. Delphes et le travail de la pierre. In: Delphes cent ans après la Grande Fouille. Essai de bilan. Actes du colloque organisé par l'EFA, 17-20 septembre 1992. A. Jacquemin, 201–213.
- HARRELL, J.A. 1992. Ancient Egyptian Limestone Quarries: A Petrological Survey. *Archaeometry* 34(2), 195–211.
- HAYWARD, C. & PITT, R. 2017. Inscriptions from ancient quarries at Kenchreai, Greece. *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik* 204, 89–96.
- HAYWARD, C.L. 1994. *A Systematic Study of the Oolitic Limestone Exposed in the Ancient Greek and Roman Construction-Stone Quarries at Examilia, near Ancient Corinth, Peloponnese*. Wiener Laboratory Internal Report, Athènes.
- HAYWARD, C.L. 1996. High-resolution provenance determination of construction-stone: A preliminary study of Corinthian oolitic limestone quarries at Examilia. *Geoarchaeology* 11(3), 215–234.
- HAYWARD, C.L. 2003. The geology of Corinth: Study of a basic resource. In: *Corinth XX. The Centenary, 1896-1996*. Athens.
- HERZ, N. & WAEKENS, M. (EDS). 1988. *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*. Springer Netherlands, Nato Science Series E.
- HEYDER, W. & MALLWITZ, A. 1978. *Das Kabirenheiligtum Bei Theben*. Berlin: Walter de Gruyter, Die Bauten Im Kabirenheiligtum Bei Theben.
- HIGGINS, M.D. & HIGGINS, R.A. 1996. *A Geological Companion to Greece and the Aegean*. 284 pp. Cornell University Press.
- HILL, B.H. 1966. *The Temple of Zeus at Nemea*. 49 pp. American School of Classical Studies

at Athens.

- HJOHLMAN, J., TRIFIRO, M.D. & KARIVIERI, A. 2008. The Kalaureia excavation project: the 2004 and 2005 seasons. *Opuscula Atheniensi*. *Annual of the Swedish Institutes at Athens* (31–32), 31–129.
- HOMOLLE, T. 1897. Topographie de Delphes. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 21(1), 256–420.
- HUBER, S., LAROCHE, D., BUBLLOT, M., JACQUEMIN, A., 2022. Delphes : les vestiges sur la terrasse de Marmaria, 2017-2021. *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger* [online]
- ICOMOS. 2008. *ICOMOS-ISCS: illustrated glossary on stone deterioration patterns*. 78 pp. ICOMOS, Paris, France, Monuments and sites, XV.
- JACKSON, M.D., MARRA, F., HAY, R.L., CAWOOD, C. & WINKLER, E.M. 2005. The Judicious Selection and Preservation of Tuff and Travertine Building Stone in Ancient Rome. *Archaeometry* 47(3), 485–510.
- JOCKEY, P. (ED.). 2009. *Leukos Lithos: Marbres et Autres Roches de La Méditerranée Antique : Études Interdisciplinaires : Actes Du VIIIe Colloque International de l'Association for the Study of Marble and Other Stones Used in Antiquity (ASMOSIA)*. 998 pp. Maison méditerranéenne des sciences de l'Homme, Paris.
- JOHNSON, F.P. 1931. *Corinth IX.1. Sculpture, 1896-1923*. 158 pp. American School of Classical Studies, Cambridge, Mass, Corinth.
- JOLIVET, L. 2001. A comparison of geodetic and finite strain pattern in the Aegean, geodynamic implications. *Earth and Planetary Science Letters* 187(1), 95–104.
- JOLIVET, L. & BRUN, J.-P. 2010. Cenozoic geodynamic evolution of the Aegean. *International Journal of Earth Sciences* 99(1), 109–138.
- JOLIVET, L. & FACCENNA, C. 2000. Mediterranean extension and the Africa-Eurasia collision. *Tectonics* 19(6), 1095–1106.
- JOLIVET, L., BRUN, J.P., GAUTIER, P., LALLEMANT, S. & PATRIAT, M. 1994. 3D-kinematics of extension in the Aegean region from the early Miocene to the present; insights from the ductile crust. *Bulletin de la Société Géologique de France* 165(3), 195–209.

- JOLIVET, L., FACCENNA, C., HUET, B., LABROUSSE, L., LE POURHIET, L., LACOMBE, O., LECOMTE, E., BUROV, E., DENELE, Y., BRUN, J.-P., PHILIPPON, M., PAUL, A., SALAÜN, G., KARABULUT, H., PIROMALLO, C., MONIE, P., GUEYDAN, F., OKAY, A.I., OBERHÄNSLI, R., POURTEAU, A., AUGIER, R., GADENNE, L. & DRIUSSI, O. 2013. Aegean tectonics: Strain localisation, slab tearing and trench retreat. *Tectonophysics* 597–598, 1–33.
- JOST, M. 1985. *Sanctuaires et cultes d'Arcadie*. 592 pp. J. Vrin, Paris, Etudes péloponnésienes.
- KANELLOPOULOS, CH. & PARTIDA, E. 2021. The Temple of Zeus at Lebadea. The architecture and the semantics of a colossus. *Opuscula. Annual of the Swedish Institutes at Athens and Roma* (14), 363–400.
- KAVVADIAS, P. 1891. *Fouilles d'Épidaure*. 122 pp. S.C. Vlastos, Athènes.
- KERAUDREN, B. & SOREL, D. 1987. The terraces of Corinth (Greece) — A detailed record of eustatic sea-level variations during the last 500,000 years. *Marine Geology* 77(1), 99–107.
- KERSHAW, S. & GUO, L. 2003. Pleistocene cyanobacterial mounds in the Perachora Peninsula, Gulf of Corinth, Greece: structure and applications to interpreting sea-level history and terrace sequences in an unstable tectonic setting. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 193(3), 503–514.
- KERSHAW, S. & GUO, L. 2006. Pleistocene calcified cyanobacterial mounds, Perachora Peninsula, central Greece: a controversy of growth and history. *Geological Society, London, Special Publications* 255(1), 53–69.
- KISSEL, C. & LAJ, C. 1988. The Tertiary geodynamical evolution of the Aegean arc: a paleomagnetic reconstruction. *Tectonophysics* 146(1), 183–201.
- KISSEL, C., LAJ, C., POISSON, A. & GÖRÜR, N. 2003. Paleomagnetic reconstruction of the Cenozoic evolution of the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics* 362(1), 199–217.
- KLEMM, D.D. & KLEMM, R. 2001. The building stones of ancient Egypt – a gift of its geology. *Journal of African Earth Sciences* 33(3), 631–642.
- KOKKOROU-ALEVRA, G., POUPAKI, E., EUSTATHOPOULOS, A. & CHATZIKONSTANTINOU, A. 2014. *Corpus Αρχαίων Λατομείων. Λατομεία Του Ελλαδικού Χώρου Από Τους Προϊστορικούς Έως Τους Μεσαιωνικούς Χρόνους*. Athens.
- KOKKOROU-ALEVRAS, G., EFSTATHOPOULOS, A., POUPAKI, E. & CHATZIKONSTANTINOU, A.

2009. Ancient Quarries of Kythera. In: ASMOSIA VIII. Aix-en-Provence.
- KONECRY, A., ARAVANTINOS, V. & MARCHESE, R. (EDS). 2013. *Plataiai. Archäologie Und Geschichte Einer Boiotischen Polis*. Österreichisches Archäologisches Institut, Österreichisches Archäologisches Institut, Sonderschriften 48.
- KORRES, M. 1995. *Du Pentélique au Parthénon : les carrières anciennes et l'histoire d'un chapiteau dorique inachevé du premier Parthénon de marbre*. 61 pp. Ed. Melissa Fondation pour la culture hellénique, Athènes Paris.
- KORRÈS, M. 2000. *The Stones of the Parthenon*. J. Paul Getty Museum.
- ΚΟΥΚΟΥΒΟΥ, Α. 2010. Λατομεία πωρόλιθου στην περιοχή της αρχαίας Βέροιας: μελέτη για την λατομία οικοδομικού λίθου στην αρχαιότητα [Poros quarries in the area of ancient Veroia: a study on building stone quarrying in antiquity].
- ΚΟΥΚΟΥΒΟΥ, Α. 2012. *Lithon Latomein: Quarrying Stone. From the Asomata Quarries to the Buildings of the Macedonian Kings. A Study on Quarrying Poros Limestone in Antiquity*. 368 pp. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΟΡΝΗΛΙΑ ΣΦΑΚΙΑΝΑΚΗ, Thessalonique.
- ΚΟΥΚΟΥΒΟΥ, Α. 2020. Building Cities in Macedonia: the Stone Quarries and the Urban Development of the Kingdom. *Scienze dell'Antichità* 26(3), 119–132.
- KOUZELI, C. & DIMOU, E. 2009. Building materials (except Pentelic marble) used in ancient Athens. In: *Leukos Lithos. Marbres et Autres Roches de La Méditerranée Antique : Études Interdisciplinaires*. ASMOSIA VIII. Aix-en-Provence, 291–308.
- KOZELJ, T. 1988a. Extraction of Blocks in Antiquity: Special Methods of Analysis. In: Herz, N. & Waelkens, M. (eds) *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*. Springer, Dordrecht, NATO ASI Series, 31–39.
- KOZELJ, T. 1988b. Extraction of blocks in Antiquity: special methods of analysis. In: *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*. Springer, 31–39.
- KRANIS, H.D. & PAPANIKOLAOU, D.I. 2001. Evidence for detachment faulting on the NE Parnassos mountain front (Central Greece). *Bulletin of the Geological Society of Greece* 34(1), 281–287.
- LAROCHE, D. & JACQUEMIN, A. 2001. Un matériau de construction méconnu à Delphes : la brique crue. In: *Techniques et Sociétés En Méditerranée. Mélanges M.-Cl. Amouretti, Eds. J.-P. Brun et Ph. Jockey*. 389–398.

- LAROCHE, D. & NENNA, M.-D. 1993. Études sur les trésors en poros à Delphes. *Publications de l'Institut Français d'Études Anatoliennes* 3(1), 227–245.
- LAZZARINI, L. 2004. *Pietre e marmi antichi: natura, caratterizzazione, origine, storia d'uso, diffusione, collezionismo*. 194 pp. CEDAM, Padova.
- LAZZARINI, L. 2007. *Poikiloi lithoi, versicolores maculae: i marmi colorati della Grecia antica*. 285 pp. Pisa, Italie.
- LE PICHON, X. & ANGELIER, J. 1979. The hellenic arc and trench system: A key to the neotectonic evolution of the eastern mediterranean area. *Tectonophysics* 60(1), 1–42.
- LE TALLEC, Y. 2014. Les carrières de roches marbrières de la péninsule du Magne. Géographie et Histoire. *Dialogues d'histoire ancienne* 11(1), 149–170.
- LEEDER, M.R., SEGER, M.J. & STARK, C.P. 1991. Sedimentation and tectonic geomorphology adjacent to major active and inactive normal faults, southern Greece. *Journal of the Geological Society* 148(2), 331–343.
- LEEDER, M.R., MACK, G.H., BRASIER, A.T., PARRISH, R.R., MCINTOSH, W.C., ANDREWS, J.E. & DUERMEIJER, C.E. 2008. Late-Pliocene timing of Corinth (Greece) rift-margin fault migration. *Earth and Planetary Science Letters* 274(1), 132–141.
- LEFEVRE, F. 2007. *Histoire du monde grec antique*. Librairie Générale Française, Paris.
- LEFEVRE-NOVARO, D. 2000. Le culte d'Héra à Pérachora (VIII-VIe s.) : essai de bilan. *Revue des Études Grecques* 113(1), 42–69.
- LEGRAND, P.-E. 1897. Fouilles de Trézène. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 21(1), 543–551.
- LEHNER, M. 2012. Die erste Feldkampagne des griechisch-österreichischen Projekts „Archaia Pheneos“. *Archäologie Österreichs* 23(1), 57–59.
- LEHNER, M., MAIER, H. & TRINKL, E. 2013. Die zweite Feldkampagne des griechisch-österreichischen Projekts „Archaia Pheneos“. *Archäologie Österreichs* 24(1), 52–54.
- LEMERLE, P. 1935. Chronique des fouilles et découvertes archéologiques dans l'Orient hellénique en 1934. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 59(1), 234–309.
- LEPSIUS, R. 1890. *Griechische Marmorstudien*. 135 pp. Könige. Akademie der Wissenschaften,

Berlin.

- LEPSIUS, R. 1893. *Geologie von Attika: Ein Beitrag zur Lehre vom Metamorphismus der Gesteine*. 237 pp. D. Reimer.
- LISTER, G.S., BANGA, G. & FEENSTRA, A. 1984. Metamorphic core complexes of Cordilleran type in the Cyclades, Aegean Sea, Greece. *Geology* 12(4), 221–225.
- LOLOS, Y. (ED.). 2021. *Sikyon I. The Urban Survey*. National Hellenic Research Foundation, Athens, Meletemata, 82.
- LOLOS, Y.A. 2002. A Public Column Drum from a Corinthian Quarry. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 71(2), 201–207.
- LUCAS, T. 2019. Entre Attique et Béotie : identités politiques et culturelles à la frontière. In: *La Béotie de l'archaïsme à l'époque Romaine. Frontières, Territoires, Paysages*. Éditions de Boccard.
- LUCAS, T. & SANCHEZ, J.G. 2022. Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021). *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger [Online]*.
- LYKOUSIS, V., SAKELLARIOU, D., MORETTI, I. & KABERI, H. 2007. Late Quaternary basin evolution of the Gulf of Corinth: Sequence stratigraphy, sedimentation, fault–slip and subsidence rates. *Tectonophysics* 440(1), 29–51.
- MACGILLIVRAY, J.A., SACKETT, L.H., SMYTH, D., DRIESSEN, J., LYNESS, D.G., HOBBS, B.A. & PEATFIELD, A.A.D. 1984. An Archaeological Survey of the Roussolakkos Area at Palaikastro. *The Annual of the British School at Athens* 79, 129–159.
- MALFILATRE, C. 2012. *Mise au point d'une méthodologie analytique d'identification des pierres naturelles de construction*. Université de Rennes, 466 pp.
- MARCHAND, J.C. 2002. *Well-Built Kleonai: A History of the Peloponnesian City Based on a Survey of the Visible Remains and a Study of the Literary and Epigraphic Sources*. Thèse de doctorat, University of California, 748 pp.
- MARCHAND, J.C. 2009. Kleonai, the Corinth–Argos Road, and the 'Axis of History'. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 78(1), 107–163.
- MARCONI, C. & TUCCI, P.L. 2014. *The Materials and Techniques of Greek and Roman Architecture*. Oxford University Press.

- MARTIN, R. 1965. *Manuel d'architecture Grecque. I : Matériaux et Techniques*. A. et J. Picard. 522 pp.
- MARTÍNEZ-TORRES, L.M. 2007. Lithological maps of churches in the Diocese of Vitoria (Spain): Space–time distribution of building stones and ancient quarries. *Building and Environment* 42(2), 860–865.
- MATHE, V. 2010. *Le Prix de La Construction En Grèce Aux IVe et IIIe Siècles Avant J.-C. : Étude Sur Les Chantiers Financés Par Les Sanctuaires de Delphes, d'Epidaure et de Délos*. Thèse de doctorat, Lyon 2.
- MATTERN, T. 2013. Kleonai: Neue Forschungen in einer Stadt des ›Dritten Griechenlands‹. In: *The Corinthia and the Northeast Peloponnese*. Hirmer, München, 323–332.
- MATTERN, T. 2015. *Das Herakles-Heiligtum von Kleonai : Architektur Und Kult Im Kontext*. Reichert.
- MCCREDIE, J.R. & STEINBERG, A. 1960. Two Boeotian Dedications. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 29(2), 123–125.
- MCKENZIE, D. 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 30(2), 109–185.
- MÈGE, F., BELFIORE, C., MONACO, C., PEZZINO, A. & TRÉZINY, H. 2020. Premier bilan des recherches sur la pierre de construction à Mégara Hyblaea. *Premier bilan des recherches sur la pierre de construction à Mégara Hyblaea*, 339–357.
- MELFOS, V., VAXEVANOPOULOS, M., TSIVILIKA, M. & VAVALIOU, M. 2016. Mineralogical and C-O isotopic characteristics of the oolitic limestone of Perachora, Tyrnavos, Thessaly, Greece. The ancient quarries and some particular uses during antiquity. In: 41st International Symposium on Archaeometry. Kalamata, 143–144.
- MENADIER, B. 1995. *The Sixth Century BC Temple and the Sanctuary and Cult of Hera Akraia, Perachora*. University of Cincinnati.
- METTOS, A., RONDOYANNI, T. & IOAKIM, C. 2009. Reconsideration of the structural relationship between the Parnassus–Ghiona and Vardoussia geotectonic zones in central Greece. *International Journal of Earth Sciences* 98(8), 1927–1934.
- MILLER, S.G. 1990. *Nemea: A Guide to the Site and Museum*. 240 pp. University of California Press.

- MILLER, S.G., KNAPP, R.C. & CHAMBERLAIN, D. 2001. *Excavations at Nemea II. The Early Hellenistic Stadium*. 385 pp. University of California Press, Berkeley Los Angeles London, Nemea.
- MIRIELLO, D., BARCA, D., CRISCI, G.M., BARBA, L., BLANCAS, J., ORTIZ, A., PECCI, A. & LUJAN, L.L. 2011. Characterization and Provenance of Lime Plasters from the Templo Mayor of Tenochtitlan (mexico City). *Archaeometry* 53(6), 1119–1141.
- MOLTESEN, M. 1994. *The Lepsius Marble Samples*. 94 pp. Ny Carlsberg Glyptotek, Copenhagen.
- MORETTI, I., SAKELLARIOU, D., LYKOUSIS, V. & MICARELLI, L. 2003. The Gulf of Corinth: an active half graben? *Journal of Geodynamics* 36(1), 323–340.
- MORRIS, A. & ANDERSON, M. 1996. First palaeomagnetic results from the Cycladic Massif, Greece, and their implications for Miocene extension directions and tectonic models in the Aegean. *Earth and Planetary Science Letters* 142(3), 397–408.
- MÜLLER, C. 1995. Le Ptoion et Akraiphia (Béotie). *Bulletin de Correspondance Hellénique* 119(2), 655–660.
- MÜLLER, C. 1996a. Le Ptoion et Akraiphia (Béotie). *Bulletin de Correspondance Hellénique* 120(2), 853–864.
- MÜLLER, C. 1996b. Les recherches françaises à Thespies et au Val des Muses. A. Hurst et A. Schachter, ed., *La montagne des Muses*, Genève, Droz.
- NAVELOT, V. 2018. *Caractérisations structurale et pétrophysique d'un système géothermique en contexte volcanique d'arc de subduction : exemple de l'archipel de Guadeloupe*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- NENNA, M.-D. & LAROCHE, D. 1990. Le trésor de Sicyone et ses fondations. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 114(1), 241–284.
- NEUMANN, K. & PARTSCH, J. 1885. *Physikalische Geographie von Griechenland: mit besonderer Rücksicht auf das Alterthum*. 475 pp. W. Koebner, Breslau.
- NIEMINEN, P. & UUSINOKA, R. 1988. The role of pore properties of rocks in the decay problem of building stones. In: *International Symposium. The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites: Preservation and Protection*. 809–813.

- NIXON, C.W., MCNEILL, L.C., BULL, J.M., BELL, R.E., GAWTHORPE, R.L., HENSTOCK, T.J., CHRISTODOULOU, D., FORD, M., TAYLOR, B., SAKELLARIOU, D., FERENTINOS, G., PAPATHEODOROU, G., LEEDER, M.R., COLLIER, R.E.L., GOODLIFFE, A.M., SACHPAZI, M. & KRANIS, H. 2016. Rapid spatiotemporal variations in rift structure during development of the Corinth Rift, central Greece. *Tectonics* 35(5), 1225–1248.
- OBER, J. 1983. Two Ancient Watchtowers above Aigosthena in the Northern Megarid. *American Journal of Archaeology* 87(3), 387–392.
- OBER, J. 1987. Early Artillery Towers: Messenia, Boiotia, Attica, Megarid. *American Journal of Archaeology* 91(4), 569–604.
- ORI, G.G. 1989. Geologic history of the extensional basin of the Gulf of Corinth (?Miocene-Pleistocene), Greece. *Geology* 17(10), 918–921.
- ORLANDOS, A.K. 1968. *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs*. 316 pp. E. de Boccard, Paris, Travaux et Mémoires, 16.
- PAGOUNIS, M., GATZOGIANNIS, A., GERTSOS, T. & INSTITUTE OF GEOLOGY AND MINERAL EXPLORATION. 1988. *Geological Map of Greece, Vayia Sheet*. IGME, Athènes.
- PALAGIA, O. & HERZ, N. 2002. Investigation of marbles at Delphi. In: *ASMOSIA V: Interdisciplinary Studies on Ancient Stone: Proceedings of the Fifth International Conference of the Association for the Study of Marble and Other Stones in Antiquity*. Archetype Publications, Boston.
- PAPAGEORGAKIS, J. & KOLAITI, E. 1992. The ancient limestone quarries of Profitis Elias near Delfi (Greece). In: *Ancient Stones: Quarrying, Trade and Provenance. Interdisciplinary Studies on Stones and Stone Technology in Europe and Near East from the Prehistoric to the Early Christian Period*. Leuven University Press.
- PAPANIKOLAOU. 1993. Geotectonic evolution of the Aegean. *Bull. Soc. Geol. Greece Bull. Soc. Geol. Greece* 28, 33–48.
- PAPANIKOLAOU, D. 2013. Tectonostratigraphic models of the Alpine terranes and subduction history of the Hellenides. *Tectonophysics* 595–596, 1–24.
- PAPANIKOLAOU, D.J. & ROYDEN, L.H. 2007. Disruption of the Hellenic arc: Late Miocene extensional detachment faults and steep Pliocene-Quaternary normal faults—Or what happened at Corinth? *Tectonics* 26(5).

- PAPASTAMATIOU, I., TATARIS, A. & MARAGOUDAKIS, N. 1971. *Geological map of Greece, Levadhia*. IGME, Athènes.
- PAYNE, H. 1940. *Perachora: The Sanctuary of Hera Akraia and Limenia : Excavations of the British School of Archaeology at Athens, 1930-1933. Architecture, Bronzes, Terracottas*. 272 pp. Clarendon Press, Oxford.
- PENTTINEN, A. & WELLS, B. 2009. Report on the excavations in the years 2007 and 2008 southeast of the Temple of Poseidon at Kalaureia. *Opuscula. Annual of the Swedish Institutes at Athens and Rome (OpAthRom) (2)*, 89–141.
- PE-PIPER, G. & PIPER, D.J.W. 1984. Tectonic setting of the Mesozoic Pindos basin of the Peloponnese, Greece. *Geological Society, London, Special Publications 17(1)*, 563–567.
- PERRIER, A., DEVOLDER, M. & FADIN, L. 2022. Les carrières de calcaire dites ‘du Stade’ et ‘du Logari’ à Delphes. *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger (BAEFE) 3(3)*, 1.
- PFAFF, C.A. 2003. *The Argive Heraion: The architecture of the classical temple of Hera*. American School of Classical Studies at Athens. 367 pp. Athens.
- PHILIPPSON, A. 1892. *Der Peloponnes: Versuch Einer Landeskunde Auf Geologischer Grundlage*. R. Friedländer, Berlin.
- PIERART, M. 1996. Vingt ans de recherches sur Argos : 1972-1991. Première partie : Sources écrites, matériel archéologique. *Topoi. Orient-Occident 6(1)*, 9–48.
- PIERART, M. & TOUCHAIS, G. 2013. *Argos : Une ville grecque de 6000 ans*. 128 pp. CNRS Éditions, Paris, Patrimoine de la Méditerranée.
- PIERART, M., THALMANN, J.-P., PARIENTE, A., AUPERT, P., MORETTI, J.-C. & CROISSANT, F. 1987. Argos. *Bulletin de Correspondance Hellénique 111(2)*, 585–609.
- PICCARDI, L., 2000. Active faulting at Delphi, Greece: Seismotectonic remarks and a hypothesis for the geologic environment of a myth. *Geology 28(7)*, 651-654.
- PICCARDI, L., MONTI, C., VASELLI, O., TASSI, F., GAKI-PAPANASTASSIOU, K., PAPANASTASSIOU, D., 2008. Scent of a myth: tectonics, geochemistry and geomythology at Delphi (Greece). *Journal of the Geological Society 165(1)*, 5-18.
- PIPER, D.J.W. 2006. Sedimentology and tectonic setting of the Pindos Flysch of the

- Peloponnese, Greece. *Geological Society, London, Special Publications* 260(1), 493–505.
- POMTOW, H. 1907. Gesteinsproben von den delphischen Bauten und Weihgeschenken. *Philologos : Zeitschrift für das klassische Altertum* 11, 160–286.
- PORTMAN, C., ANDREWS, J.E., ROWE, P.J., LEEDER, M.R. & HOOGEWERFF, J. 2005. Submarine-spring controlled calcification and growth of large *Rivularia* bioherms, Late Pleistocene (MIS 5e), Gulf of Corinth, Greece. *Sedimentology* 52(3), 441–465.
- PRIGNITZ, S. 2014. *Bauurkunden und Bauprogramm von Epidauros, 400-350: Asklepiostempel, Tholos, Kultbild, Brunnenhaus*. C.H. Beck, 395 pp.
- REBRIK, BORIS M., REBRIK, BORIS MICHAJLOVIČ & KRÜGER, P. 1987. *Geologie Und Bergbau in Der Antike*. Dt. Verlag für Grundstoffindustrie.
- RHODES, R.F. 1987. Early Stoneworking in the Corinthia. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 56(2), 229–232.
- RHOMAIOS, K.A., POULSEN, F. & DYGGVE, E. 1934. *Das Heroon von Kalydon*. Levin og Munskgaard, København.
- ROBERTSON, A.H.F., DIXON, J.E., BROWN, S., COLLINS, A., MORRIS, A., PICKETT, E., SHARP, I. & USTAÖMER, T. 1996. Alternative tectonic models for the Late Palaeozoic-Early Tertiary development of Tethys in the Eastern Mediterranean region. *Geological Society, London, Special Publications* 105(1), 239–263.
- ROBERTSON, J., ROBERTS, G.P., IEZZI, F., MESCHIS, M., GHEORGHU, D.M., SAHY, D., BRISTOW, C. & SGAMBATO, C. 2020. Distributed normal faulting in the tip zone of the South Alkyonides Fault System, Gulf of Corinth, constrained using ³⁶Cl exposure dating of late-Quaternary wave-cut platforms. *Journal of Structural Geology* 136, 104063.
- ROESCH, P. & ARGOUD, G. (EDS). 1985. *La Béotie antique: Lyon, Saint-Etienne, 16-20 mai 1983*. Éditions du Centre national de la recherche scientifique, Paris.
- ROHAIS, S. & MORETTI, I. 2017. Structural and Stratigraphic Architecture of the Corinth Rift (Greece): An Integrated Onshore to Offshore Basin-Scale Synthesis. In: Roure, F., Amin, A.A., Khomsi, S. & Al Garni, M.A.M. (eds) *Lithosphere Dynamics and Sedimentary Basins of the Arabian Plate and Surrounding Areas*. Springer International Publishing, Cham, *Frontiers in Earth Sciences*, 89–120.

- ROLLER, D.W. 1987. Tanagra Survey Project 1985. The Site of Grimadha. *The Annual of the British School at Athens* 82, 213–232.
- ROSS, L. 1855. *Archäologische Aufsätze*. 286 pp. B. G. Teubner, Leipzig.
- ROUSSET-TOURNIER, B. 2001. *Transferts par capillarité et évaporation dans des roches : rôle des structures de porosité*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 203 pp.
- ROUX, G. 1954. Le Val des Muses, et les Muses chez les auteurs anciens. *Bulletin de Correspondance Hellénique* 78(1), 22–48.
- ROUX, G. 1966. Les Comptes du IV^e siècle et la reconstruction du Temple d'Apollon à Delphes. *Revue Archéologique* (2), 245–296.
- RUSSELL, B. 2013. Gazetteer of Stone Quarries in the Roman World. *Database Oxford*.
- RUSSELL, B. 2017. Stone quarrying in Greece: ten years of research. *Archaeological Reports* 63, 77–88.
- SAKELLARIOU, M.V. & PHARAKLAS, N. 1972. *Megaris, Aigosthena, Ereneia*. Αθηναϊκόν Κέντρον Οικιστικής, Athènes, Αρχαίες Ελληνικές Πόλεις, 14.
- SAVOYAT, E., VERDIER, A. & MONOPOLIS, D. 1971. *Geological map of Greece, Argos sheet*. IGME, Athènes.
- SCHÖN, J. 2015. *Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics*. 2nd édition. Elsevier, Developments in Petroleum Sciences.
- SEBRIER, M. 1977. *Tectonique Récente d'une Transversale à l'Arc Egéen : Le Golfe de Corinthe et Ses Régions Périphériques*. Paris Sud Centre d'Orsay.
- SHAW, J.W. 2009. *Minoan Architecture: Materials and Techniques*. [Revised edition]. 337 pp. Bottega d'Erasmus A. Ausilio, Padova, Studi di Archeologia Cretese.
- STEWART, I. & VITA-FINZI, C. 1996. Coastal uplift on active normal faults: The Eliki Fault, Greece. *Geophysical Research Letters* 23(14), 1853–1856.
- STROHMENGER, C. & WIRSING, G. 1991. A proposed extension of Folk's (1959, 1962) textural classification of carbonate rocks. *Carbonates and Evaporites* 6(1), 23–28.

- SUESSKOCH, H. & BANNERT, D. 1984. *Geological map of Greece, Methana sheet*. IGME, Athènes.
- TATARIS, A., MARAGOUDAKIS, N. & KOUNIS, G. 1970a. *Geological Map of Greece, Nemea Sheet*. IGME, Athènes.
- TATARIS, A., KOUNIS, G. & MARAGOUDAKIS, N. 1970b. *Geological map of Greece, Thivai sheet*. IGME, Athènes.
- TAUSEND, K. 2000. *Pheneos und Lousoi: Untersuchungen Zu Geschichte Und Topographie Nordostarkadiens*. 506 pp. Peter Lang, Bern.
- TAYLOR, B., WEISS, J.R., GOODLIFFE, A.M., SACHPAZI, M., LAIGLE, M. & HIRN, A. 2011. The structures, stratigraphy and evolution of the Gulf of Corinth rift, Greece. *Geophysical Journal International* 185(3), 1189–1219.
- THEODOROPOULOS, D. 1968. *Stratigraphie und Tektonik des Isthmus von Megara (Griechenland)*. Erlangen.
- THEOULAKIS, P. & BARDANIS, M. 2000. The stone of Piraeus at the monuments of the Acropolis of Athens. In: Fassina, V. (ed.) *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 255–263.
- THEOULAKIS, P., KOUZELI, K. & KILICOGLOU, V. 1988. Provenance of the building material of the Temple of Apollo Epicurios at Bassai, Greece. In: *International Symposium. The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites: Preservation and Protection*. 661–669.
- TIENNOT, M. 2017. *Influence des propriétés physico-mécaniques des minéraux argileux dans l'altération de la pierre monumentale*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- TOMLINSON, R.A. 1969. Perachora: The Remains outside the Two Sanctuaries. *The Annual of the British School at Athens* 64, 155–258.
- TOMLINSON, R.A. & FOSSEY, J.M. 1970. Ancient Remains on Mount Mavrovouni, South Boeotia. *Annual of the British School at Athens* 65, 243–263.
- TÖRÖK, Á. & PŘIKRYL, R. 2010. Current methods and future trends in testing, durability analyses and provenance studies of natural stones used in historical monuments. *Engineering Geology* 115(3), 139–142.

- TRECHSEL, H.R. 1994. *Moisture Control in Buildings*. 494 pp. ASTM International.
- TROUKI, É. 1993. *Αναλήμματα και περίβολοι*. Thèse de doctorat, Université Marc Bloch.
- TSELENTIS, G.-A. & MAKROPOULOS, K.C. 1986. Rates of crustal deformation in the Gulf of Corinth (central Greece) as determined from seismicity. *Tectonophysics* 124(1), 55–66.
- TSODOULOS, I.M., KOUKOUVELAS, I.K. & PAVLIDES, S. 2008. Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, Central Greece). *Tectonophysics* 453(1), 211–232.
- TURMEL, A., FRONTEAU, G., THOMACHOT-SCHNEIDER, C., MOREAU, C., CHALUMEAU, L. & BARBIN, V. 2014. Stone uses in Reims Cathedral: provenance, physical properties and restoration phases. *Geological Society, London, Special Publications* 391(1), 17–30.
- TURNER, L.A. 1994. *The History, Monuments and Topography of Ancient Lebadeia in Boeotia, Greece*. University of Pennsylvania.
- TZILIGKAKI, E. & STAMATAKIS, M.G. 2018. Underground quarries in the area of Agiades, Samos Island, Greece: Notes on historical topography and chronology.
- VALDEON, L., ESBERT, R.M. & GROSSI, C.M. 1992. Hydric Properties of Some Spanish Building Stones: A Petrophysical Interpretation. *MRS Online Proceedings Library (OPL)* 267, 911.
- VALKANIOTIS, S., PAPATHANASIOU, G., PAVLIDES, S., 2011. Active faulting and earthquake-induced slope failures in archeological sites: case study of Delphi, Greece. In: Proceedings, 2nd INQUA-IGCP567 International Workshop on Active Tectonics, Earthquake Geology, Archaeology and Engineering.
- VAN DE MAELE, S. & FOSSEY, J.M. (EDS). 1992. *Fortificationes antiquae : incluant les communications lues à un colloque tenu à l'Université d'Ottawa, octobre 1988*. 225 pp. J.C. Gieben, Amsterdam, Monographies en archéologie et histoire classiques de l'Université McGill, 12.
- VAN HINSBERGEN, D.J.J., HAFKENSCHIED, E., SPAKMAN, W., MEULENKAMP, J.E. & WORTEL, R. 2005. Nappe stacking resulting from subduction of oceanic and continental lithosphere below Greece. *Geology* 33(4), 325–328.
- VARTI-MATARANGAS, M. & MATARANGAS, D. 2000. Microfacies analysis and endogenic decay causes of carbonate building stones at the Asklepion Epidaurus monuments of

- Peloponnessos, Greece. *Journal of Cultural Heritage* 1(2), 165–177.
- VETTOR, T., SAUTTER, V., PONT, S., HARIVEL, C., JOLIVET, L., MORETTI, I. & MORETTI, J.C. 2021. Delos Archaeological Marbles: A Preliminary Geochemistry-Based Quarry Provenance Study. *Archaeometry* 63(5), 907–922.
- VETTOR, T., SAUTTER, V., JOLIVET, L., MORETTI, J.-C. & PONT, S. 2022. Marble quarries in Delos Island (Greece): a geological characterization. *Bulletin de la Société Géologique de France* 193(1), 16.
- VIKATOU, O., HANDBERG, S., MICHAELIDES, N. & BARFOED, S. 2019. Topographical Work in Ancient Kalydon, Aitolia (2015-18). *Proceedings of the Danish Institute at Athens IX*, 161–188.
- VON EICKSTEDT, K.-V. 1991. *Beiträge zur topographie des antiken Piräus*. Βιβλιοθήκη τής εν Αθήναις αρχαιολογικής εταιρείας. 296 pp. Athènes, 118.
- VON FREYBERG, B. 1973. *Geologie des Isthmus von Korinth*. 183 pp. Erlangen, Erlanger Geologische Abhandlungen.
- WAEKENS, M., HERZ, N. & MOENS, L. (EDS). 1992. *Ancient Stones: Quarrying, Trade and Provenance: Interdisciplinary Studies on Stones and Stone Technology in Europe and Near East from the Prehistoric to the Early Christian Period*. Leuven University Press.
- WALBERT, C. 2015. *Endommagement Par Le Gel de Pierres Calcaires Utilisées Dans Le Patrimoine Bâti : Étude Du Comportement Hydromécanique*. Thèse de doctorat, Cergy-Pontoise.
- WALDSTEIN, C. & WASHINGTON, H.S. 1891. Excavations by the American School at Plataia in 1891. Discovery of a Temple of Archaic Plan. *The American Journal of Archaeology and of the History of the Fine Arts* 7(4), 390–405.
- WALDSTEIN, C. SIR & WASHINGTON, H.S. 1902. *The Argive Heraeum*. xix+224 pp. Houghton Mifflin, Boston New-York.
- WARD-PERKINS, J.B. 1972. *Quarrying in Antiquity: Technology, Tradition and Social Change*. 24 pp. Oxford University Press, London.
- WASHBURN, E.W. 1921. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review* 17(3), 273–283.
- WASHINGTON, H.S. 1923. Excavations at Phlius in 1892. *The American Journal of Archaeology*

27(4), 438–446.

- WATSON, J. 1916. *British and Foreign Marbles and Other Ornamental Stones: A Descriptive Catalogue of the Specimens in the Sedgwick Museum, Cambridge*. 506 pp. University Press, Cambridge.
- WELTER, G. 1941. *Troizen und Kalaureia*. 71 pp. Gebr. Mann, Berlin.
- WILLIAMS, C. & BOOKIDIS, N. (EDS). 2003. *Corinth, the Centenary: 1896-1996*. 503 pp. The American School of Classical Studies at Athens, Corinth.
- WILLIAMS, C.K., MACINTOSH, J. & FISHER, J.E. 1974. Excavation at Corinth, 1973. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens* 43(1), 1–76.
- WILLIAMS, H., SCHAUS, G., PRICE, S.M.C., GOURLEY, B., LUTOMSKY, H. & CROSS, G. 1997. Excavations at Ancient Stymphalos. *Echos du monde classique: Classical views* 41(1), 23–73.
- WRIGHT, J., CHERRY, J., DAVIS, J., MANTZOURANI, E., SUTTON, S. & SUTTON, R. 1990. The Nemea Valley Archaeological Project: A Preliminary Report. *Hesperia* 59(4), 579–659.
- WURCH-KOZELJ, M. 1988. Methods of Transporting Blocks in Antiquity. In: Herz, N. & Waelkens, M. (eds) *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*. Springer Netherlands, Dordrecht, NATO ASI Series, 55–64.
- WURSTER, W. 1969. Antike Steinbrüche an der westlichen Nordküste Äginas. AA.
- WYCHERLEY, R.E. 1962. *How the Greeks Built Cities*. 271 pp. Macmillan International Higher Education.
- WYCHERLEY, R.E. 1978. *The Stones of Athens*. 293 pp. Princeton University Press, Princeton.
- WYCHERLEY, R.E. 2015. *The Stones of Athens*. 314 pp. Princeton University Press, Princeton Legacy Library.
- XIDAKIS, G.S., DIAMANTIS, J.V. & MARINOS, P.G. 1990. Building stones and geological environment in three ancient cities of Aegean Thrace, Greece. *Environmental Geology and Water Sciences* 16(1), 91–101.

Liste des figures

Figure 1. Frise chronologique simplifiée de la Grèce antique (d'après Lefèvre, 2007).....	- 15 -
Figure 2. Principe d'extraction d'un bloc (Amandry & Hansen 2010).....	- 15 -
Figure 3. Carte topographique de la zone étudiée montrant les sites archéologiques et les principaux toponymes (villes, régions, montagnes) mentionnés dans la thèse.....	- 17 -
Figure 4. Les vestiges étudiés : quelques exemples dans le Golfe de Corinthe.....	- 19 -
Figure 5. Carte tectonique de la région égéenne, d'après Jolivet et al., 2013.....	- 22 -
Figure 6. Carte tectonique simplifiée du Péloponnèse et de la Grèce centrale.	- 23 -
Figure 7. Carte géo-tectonique du remplissage sédimentaire du Golfe de Corinthe (modifié d'après Rohais et Moretti, 2017).....	- 24 -
Figure 8. Carte géologique synthétique de la région de Corinthe : le golfe de Léchaion (de Vals et Moretti, 2022).....	- 27 -
Figure 9. Carte géologique simplifiée de la région de Delphes (Kranis et Papanikolaou, 2001) et colonne stratigraphique synthétique de la zone du Parnasse.....	- 29 -
Figure 10. Dino-Lite ® (microscope digital portable) de l'EFA.	- 42 -
Figure 11. La recherche des carrières : les préparations.	- 46 -
Figure 12. Les différents types de porosité, d'après Choquette et Pray (1970) (dans Flügel, 2004).....	- 50 -
Figure 13. Exemple de spectre DRX : la calcite.	- 51 -
Figure 14. La porosimétrie par saturation à l'eau.	- 53 -
Figure 15. Schéma de la porosité connectée et non connectée (Bertrand, 2017).....	- 54 -
Figure 16. Exemple de résultat obtenu par porosimétrie au mercure.....	- 56 -
Figure 17. Dispositif de mesure de l'imbibition capillaire.....	- 57 -
Figure 18. Mesures des ondes acoustiques.....	- 59 -
Figure 19. Schéma des échantillons nécessaires pour les essais mécaniques.	- 60 -
Figure 20. Carte topographique de la Mégaride et la Béotie.	- 108 -
Figure 21. L'acropole de Pagai : les pierres mises en œuvre.....	- 109 -
Figure 22. La forteresse d'Aigosthènes : les roches mises en œuvre.	- 111 -
Figure 23. La forteresse d'Éleuthères : les pierres mises en œuvre.....	- 112 -
Figure 24. La tour de Mazi : les pierres mises en œuvre.	- 114 -
Figure 25. L'acropole de Platées : les pierres mises en œuvre.	- 115 -

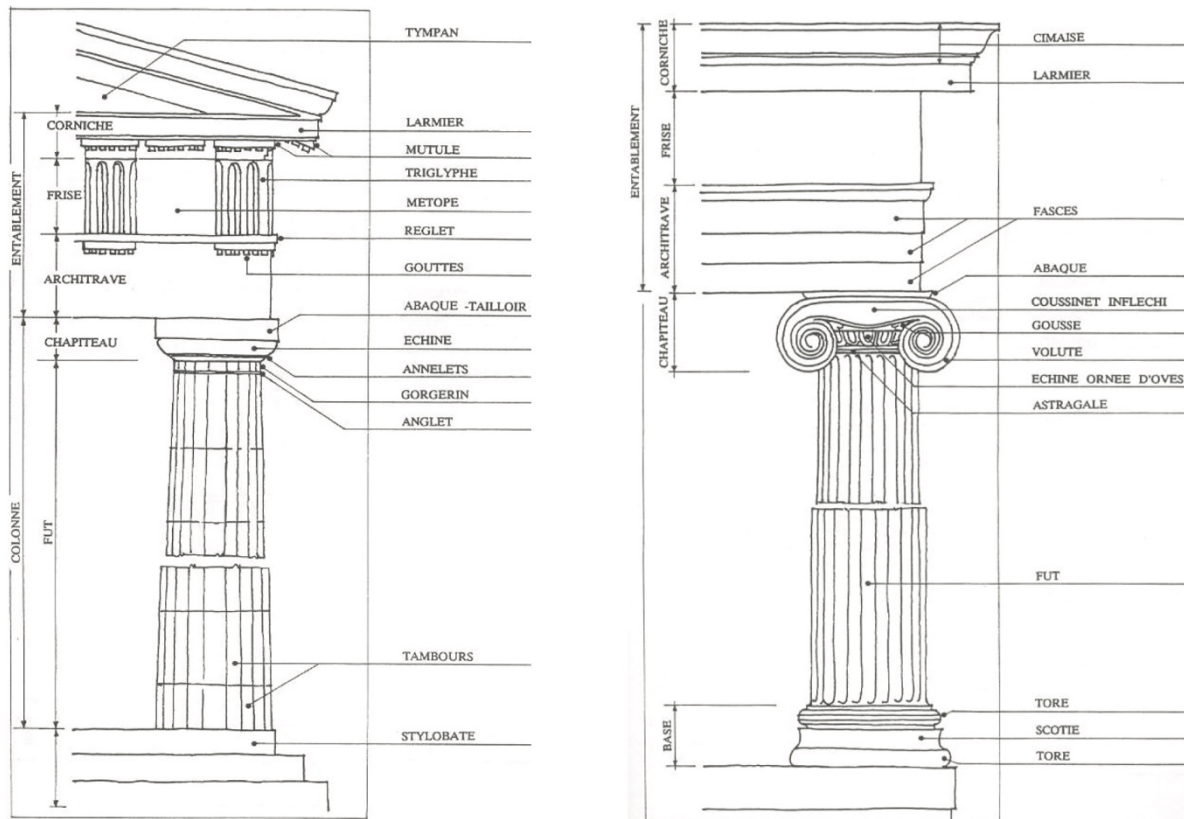
Figure 26. Le port de Kreusis : les pierres mises en œuvre.	117 -
Figure 27. Le port fortifié de Siphai : les pierres mises en œuvre.	118 -
Figure 28. Le sanctuaire de Mavrovouni : les pierres mises en œuvre.	120 -
Figure 29. La ville de Thisbé : les pierres mises en œuvre.	121 -
Figure 30. La forteresse de Chorsiai : les pierres mises en œuvre.	122 -
Figure 31. La ville de Thèbes : les pierres mises en œuvre.	124 -
Figure 32. Le Kabirion de Thèbes : les pierres mises en œuvre.	126 -
Figure 33. L'acropole d'Akraiphia : les pierres mises en œuvre.	127 -
Figure 34. Le sanctuaire d'Apollon Ptoos : les pierres mises en œuvre.	129 -
Figure 35. Le Val des Muses : les pierres mises en œuvre.	131 -
Figure 36. L'acropole d'Aliarte : les pierres mises en œuvre.	133 -
Figure 37. La forteresse d'Orchoménos : les pierres mises en œuvre.	134 -
Figure 38. Le Temple de Zeus à Livadia : les pierres mises en œuvre.	136 -
Figure 39. Cartes topographiques du le sud et de l'ouest du Golfe de Corinthe.	138 -
Figure 40. Le site de Kléonai : les pierres mises en œuvre.	143 -
Figure 41. Le sanctuaire de Némée : les pierres mises en œuvre.	145 -
Figure 42. La cité de Phlious : les pierres mises en œuvre.	147 -
Figure 43. La ville de Stymphale : les pierres mises en œuvre.	148 -
Figure 44. L'Asclépiéion de Phénéos : les roches mises en œuvre.	150 -
Figure 45. L'agora d'Argos : les pierres mises en œuvre.	153 -
Figure 46. L'Héraion d'Argos : les pierres mises en œuvre.	156 -
Figure 47. Le sanctuaire de Trézène : les roches mises en œuvre.	159 -
Figure 48. Le site de Kalaurie : les pierres mises en œuvre.	161 -
Figure 49. Le site de Kalydon : les pierres mises en œuvre.	163 -
Figure 50. Le site de Pleuron : les pierres mises en œuvre.	165 -
Figure 51. Le site d'Élis : les pierres mises en œuvre.	166 -
Figure 52. Le site d'Olympie : les pierres mises en œuvre.	168 -
Figure 53. Diversité des roches mises en œuvre dans le Golfe de Corinthe.	169 -
Figure 54. Carte topographique avec la position des 25 carrières étudiées.	173 -
Figure 55. Les carrières de Delphes.	176 -
Figure 56. La carrière du Ptoion, Akraiphia.	178 -
Figure 57. La carrière de Khorsiai.	179 -

Figure 58. La carrière de Kreusis.	180 -
Figure 59. La carrière de Tanagra.	182 -
Figure 60. Les carrières de Mégare A.	183 -
Figure 61. La carrière de Mégare B.	185 -
Figure 62. La carrière de Perachora.	186 -
Figure 63. La carrière du Lac de Perachora.	187 -
Figure 64. Carrières de la région de Corinthe.	189 -
Figure 65. Carrière du Stade d'Isthmia.	191 -
Figure 66. Les carrières de Kenchrées.	193 -
Figure 67. Les carrières de Kléonai.	195 -
Figure 68. La carrière d'Argos.	197 -
Figure 69. Les carrières de Leventochori, en Élide.	199 -
Figure 70. La carrière d'Éleusis : la roche extraite.	200 -
Figure 71. Cartes des carrières avec position des échantillons.	202 -
Figure 72. Vues microscopiques des échantillons étudiés.	208 -
Figure 74. Composition minéralogique des échantillons étudiés.	209 -
Figure 74. Cylindres des échantillons étudiés.	209 -
Figure 75. Densité apparente et densité de phase solide en fonction de la porosité.	212 -
Figure 76. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les échantillons EX.	215 -
Figure 77. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les échantillons KE.A et PE.A.	217 -
Figure 78. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les calcaires durs.	217 -
Figure 79. Résultats de la porosimétrie au mercure pour les autres faciès légers.	219 -
Figure 81. Modules élastiques secs et saturés, en fonction de la porosité.	223 -
Figure 81. Densités apparentes en fonction de la vitesse des ondes P.	223 -
Figure 82. Échantillons de DEL.B et EX après les essais brésiliens.	227 -
Figure 83. Répartition des carrières locales et régionales de la région de Corinthe par rapport à la distance (en mètre) entre la carrière et le site de mise en œuvre.	228 -
Figure 84. La collection du géologue R. Lepsius.	240 -
Figure 85. Les affleurements de calcaires du Parnasse dans la région de Delphes.	244 -
Figure 86. Les calcaires du Parnasse : description de la matrice rocheuse.	245 -
Figure 87. Les calcaires du Parnasse : mise en œuvre et altération.	246 -
Figure 88. Les affleurements de calcaire à rudistes à Delphes.	247 -

Figure 89. Le calcaire à rudistes : description de la matrice rocheuse.....	- 248 -
Figure 90. Le calcaire à rudistes : mise en œuvre et altération.	- 249 -
Figure 91. Les affleurements de calcaires lités dans la région de Delphes.....	- 250 -
Figure 92. Les calcaires lités : présentation de la matrice rocheuse.	- 251 -
Figure 93. Les calcaires lités : mises en œuvre et altération.....	- 252 -
Figure 94. Les affleurements de brèches de pente dans la région de Delphes.....	- 254 -
Figure 95. La brèche de pente : description microscopique.....	- 255 -
Figure 96. La brèche de pente : mise en œuvre et altération.....	- 256 -
Figure 97. Le flysch jaune : affleurement, mise en œuvre et description.	- 257 -
Figure 98. Le travertin du Pléistocène : affleurement et mise en œuvre.	- 259 -
Figure 99. Les affleurements de calcaire de Saint-Élie.....	- 260 -
Figure 100. Le calcaire de Saint Elie : la matrice rocheuse.	- 261 -
Figure 101. Le calcaire de Saint Elie : mise en œuvre et altération.	- 262 -
Figure 102. Le marbre de Livadia mis en œuvre.	- 263 -
Figure 103. La dune oolithique : description macroscopique et microscopique.....	- 265 -
Figure 104. La dune oolithique : mise en œuvre et altération.....	- 267 -
Figure 105. Le calcaire de Mégare : mise en œuvre et description macroscopique.....	- 269 -
Figure 106. Les pierres noires : mises en œuvre.....	- 272 -
Figure 107. Les grès inconnus : le grès bioclastique.....	- 274 -
Figure 108. Les grès inconnus : le calcaire détritique marin, le grès quartzique, le calcaire à galets et le grès rouge.	- 277 -
Figure 109. Plan lithologique des vestiges en place et des blocs errants dans le sanctuaire d'Apollon à Delphes.....	- 282 -
Figure 110. Nombre d'occurrence des roches mises en œuvre dans le site de Delphes, par origine et utilisation.	- 284 -
Figure 111. Évolution de l'utilisation des pierres (en volume %) dans le site archéologique de Delphes.....	- 287 -
Figure 112. Répartition du type de roche employé dans la construction, en fonction de l'origine, dans la région de Corinthe.....	- 291 -
Figure 113. Répartition du type de roche employé dans la construction dans la région de Corinthe, à l'exception des sanctuaires.	- 293 -
Figure 114. Schéma théorique de la provenance des roches autour d'un site type dans la région du Golfe de Corinthe.	- 295 -

Figure 115. Volumes représentés par chaque classe de roches, à Delphes.....	- 297 -
Figure 116. Les échanges de pierres dans le Golfe de Corinthe.	- 299 -
Figure 117. Le transport de pierre : exemple de Corinthe à Delphes (modifié d'après Amandry et Hansen, 2010).....	- 305 -

Annexe A : documentation archéologique



Annexe A1. Les ordres architecturaux en Grèce. A gauche : l'ordre dorique ; à droite : l'ordre ionique.

Annexe B : sites et carrières

Lieu	Numéro	Paramètres locaux						Paramètres régionaux						Paramètres allochtones											
		Calcaire dur		Travertin		Calcaire tendre		Grès		Conglomérat		Marbre		Calcaire dur		Travertin		Calcaire tendre		Grès		Conglomérat		Marbre	
		Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)	Nb	Vol (%)
Delphes	1	3	31	0	0	0	0	1	10	0	0	1	2	0	0	1	1	1	1	6	40	0	0	4	5
Pagal	2	0	0	0	1	0	0	1	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Algothènes	3	0	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elaiouère	4	1	95	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mazi	5	1	5	0	0	0	0	1	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Platiées	6	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kreusis	7	0	0	0	0	0	0	1	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Siphai	8	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mavrovouni	9	1	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Thissé	10	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chorsiai	11	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Thébes	12	1	NA	0	NA	1	NA	1	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA
Kabirion	13	1	1	0	0	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Akraiphia	14	1	90	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ploton	15	1	25	0	0	1	67	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Val des Muses	16	1	66	0	0	0	0	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Allarte	17	1	96	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Orchoménos	18	1	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Livadia	19	0	0	0	0	0	0	1	60	0	0	1	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corinthe	20	1	1	0	0	0	0	1	96	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sicyone	21	1	1	0	0	0	0	1	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perachora	22	1	1	1	88	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Isthmia	23	0	0	0	1	1	1	5	1	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kléonai	24	0	0	1	96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Némée	25	0	0	1	91	0	0	1	5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Phléous	26	1	1	0	0	0	0	1	60	0	0	1	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Symphale	27	1	79	0	0	0	0	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Phanéos	28	1	NA	1	NA	0	NA	1	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA
Argos	29	1	40	0	0	2	13	1	1	1	1	1	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heraion d'Argos	30	1	15	0	0	1	20	0	0	1	40	0	0	1	3	1	20	0	0	0	0	0	0	0	0
Epidaure	31	2	NA	0	NA	0	NA	0	NA	1	NA	0	NA	1	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA
Trézène	32	1	80	1	5	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ponos	33	1	45	0	0	0	0	1	5	0	0	1	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kalydon	34	1	5	0	0	0	0	1	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pleuron	35	1	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elis	36	0	NA	0	NA	1	NA	1	NA	1	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA
Olympie	37	0	NA	0	NA	2	NA	2	NA	1	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA	0	NA

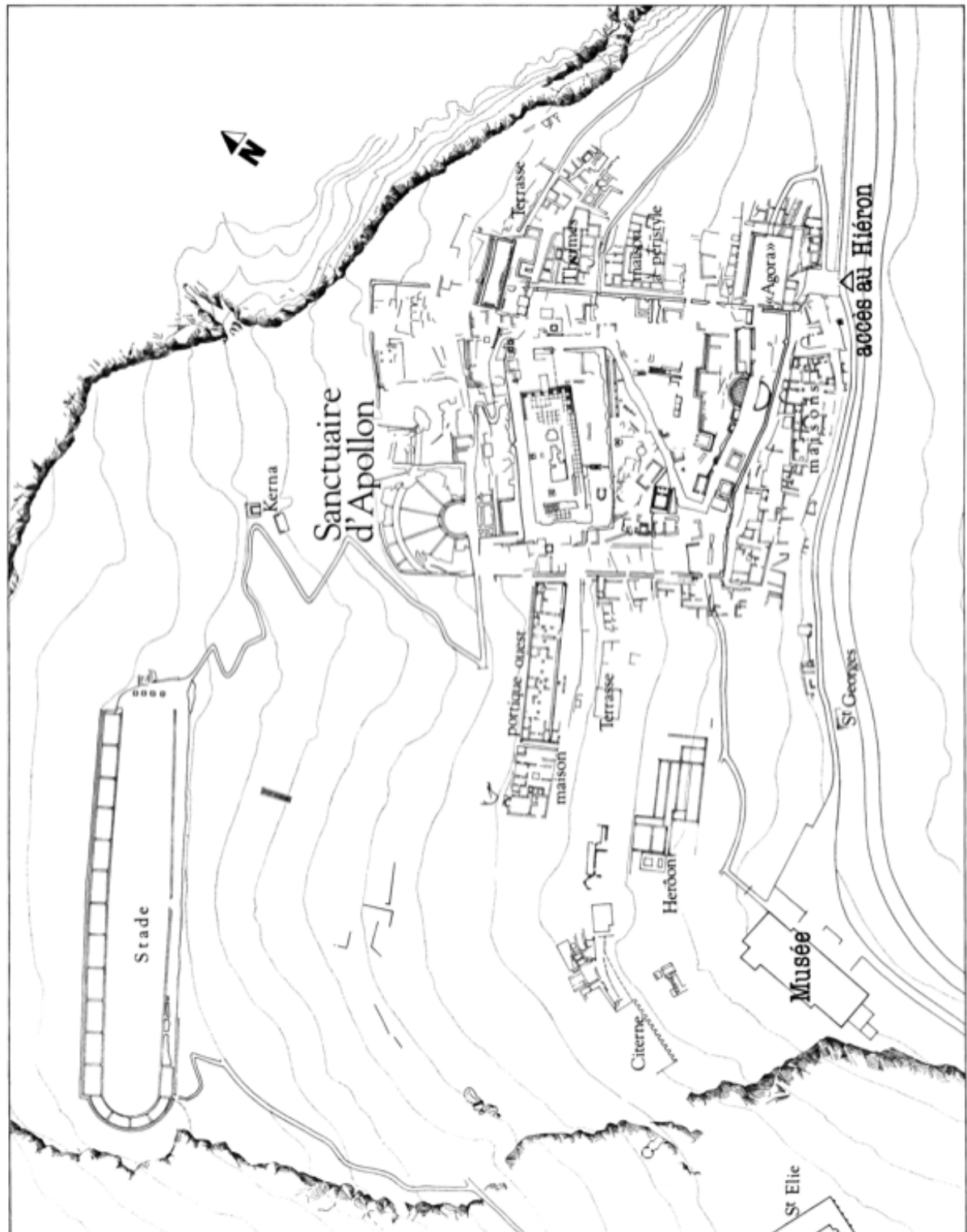
Annexe B1. Synthèse de la variété des roches et des volumes associés, par origine, dans les 37 sites archéologiques étudiés.

Type	N°	Figure	Nom	Latitude	Longitude
S	1	x	Delphes	38°28'56.16"N	22°30'4.14"E
S	2	Figure 21	Pagai	38° 5'4.42"N	23°11'11.85"E
S	3	Figure 22	Aigosthènes	38° 8'50.60"N	23°13'42.75"E
S	4	Figure 23	Eleuthères	38°10'47.32"N	23°22'31.44"E
S	5	Figure 24	Mazi	38° 9'48.88"N	23°25'28.96"E
S	6	Figure 25	Platéés	38°13'14.49"N	23°16'26.19"E
S	7	Figure 26	Kreusis	38°12'28.48"N	23° 6'37.26"E
S	8	Figure 27	Siphai	38°11'23.19"N	23° 3'7.68"E
S	9	Figure 28	Mavrovouni	38°13'34.42"N	23° 2'40.52"E
S	10	Figure 29	Thisbé	38°15'22.91"N	22°58'11.39"E
S	11	Figure 30	Chorsiai	38°15'18.87"N	22°52'58.88"E
S	12	Figure 31	Thèbes	38°19'25.96"N	23°19'3.10"E
S	13	Figure 32	Kabirion	38°19'5.99"N	23°15'19.00"E
S	14	Figure 33	Akraiphia	38°27'4.53"N	23°13'21.65"E
S	15	Figure 34	Ptoion	38°27'33.60"N	23°15'6.30"E
S	16	Figure 35	Val des Muses	38°19'14.63"N	23° 3'34.57"E
S	17	Figure 36	Aliarte	38°22'39.32"N	23° 5'14.71"E
S	18	Figure 37	Orchoménos	38°29'35.88"N	22°58'30.24"E
S	19	Figure 38	Livadia	38°25'49.16"N	22°51'37.75"E
S	20	x	Corinthe	37°54'21.64"N	22°52'45.40"E
S	21	x	Sicyone	37°59'2.14"N	22°42'49.24"E
S	22	x	Heraion de Perachora	38° 1'41.19"N	22°51'9.89"E
S	23	x	Isthmia	37°54'56.61"N	22°59'34.88"E
S	24	Figure 40	Kleonai	37°49'32.60"N	22°46'36.50"E
S	25	Figure 41	Némée	37°48'34.27"N	22°42'37.65"E
S	26	Figure 42	Phlious	37°50'40.25"N	22°38'47.67"E
S	27	Figure 43	Stymphale	37°51'33.40"N	22°27'36.70"E
S	28	Figure 44	Phénéos	37°54'32.59"N	22°18'27.34"E
S	29	Figure 45	Argos	37°37'50.06"N	22°43'15.55"E
S	30	Figure 46	Heraion d'Argos	37°41'30.62"N	22°46'30.23"E
S	31	x	Epidaure	37°35'54.24"N	23° 4'26.43"E
S	32	Figure 47	Trézène	37°30'12.23"N	23°20'53.46"E
S	33	Figure 48	Kalaurie	37°31'19.64"N	23°28'46.88"E

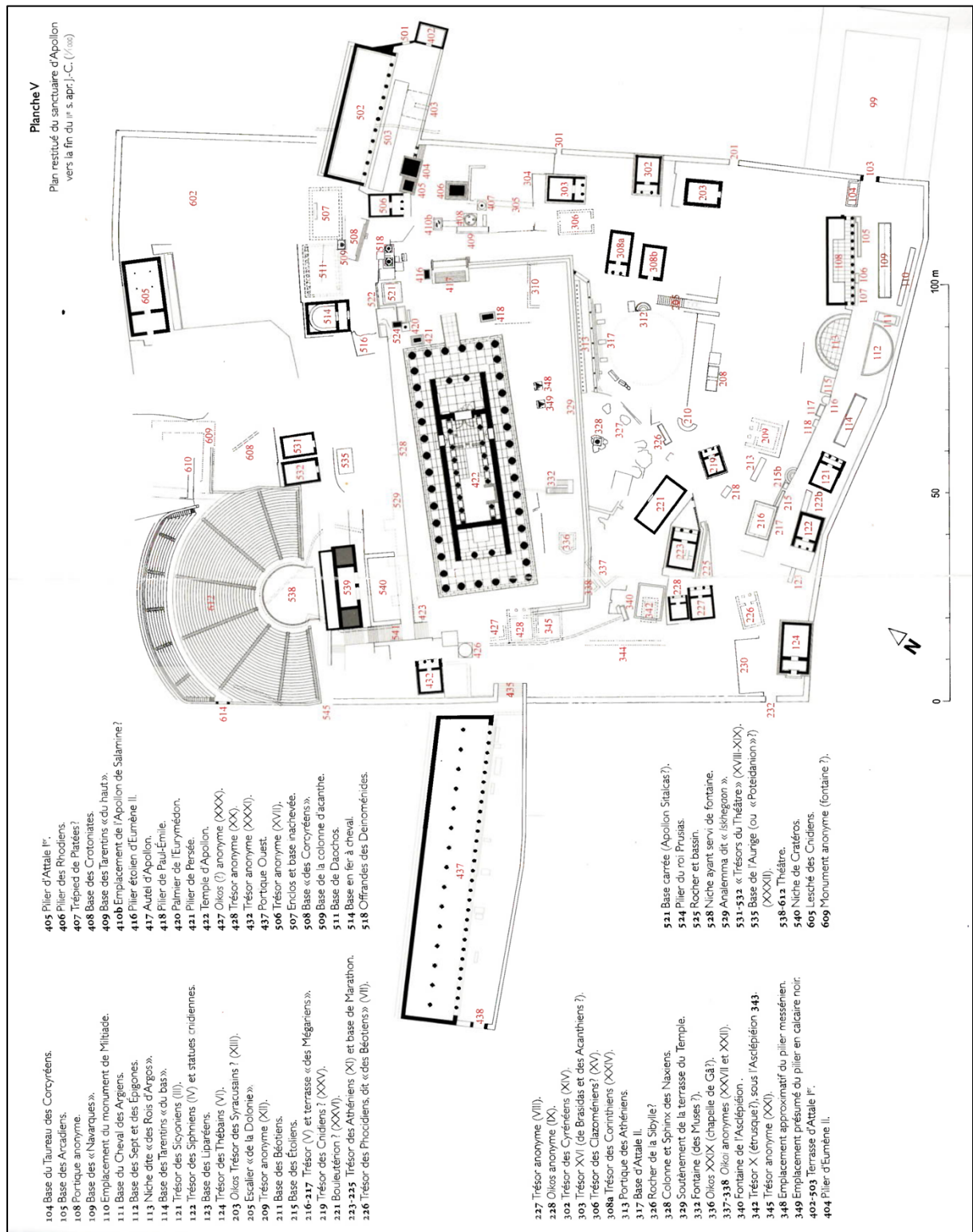
S	34	Figure 49	Kalydon	38°22'19.4"N	21°31'47.4"E
S	35	Figure 50	Pleuron	38°24'51.4"N	21°24'36.6"E
S	36	Figure 51	Elis	37°53'33.1"N	21°22'29.1"E
S	37	Figure 52	Olympie	37°38'17.3"N	21°37'48.0"E
Q	6	Figure 55	Carrières de Saint-Elie	38°29'48.28"N	22°27'4.52"E
Q	1	Figure 55	Carrière du Stade	38°29'1.12"N	22°29'47.58"E
Q	2	Figure 55	Carrière de Logari	38°28'49.61"N	22°31'23.21"E
Q	3	Figure 55	Carrière de Philomélos A	38°28'42.78"N	22°29'55.64"E
Q	4	Figure 55	Carrière de Philomélos B	38°28'41.88"N	22°29'54.79"E
Q	5	Figure 55	Carrière du Pléistos	38°28'20.1"N	22°30'30.5"E
Q	13	Figure 62	Carrière du Cap de l'Heraion	38° 1'47.97"N	22°51'9.52"E
Q	14	Figure 63	Carrière du Lac, Perachora	38° 1'29.81"N	22°54'16.84"E
Q	22	Figure 67	Carrières de Kleonai	37°48'14.37"N	22°45'28.23"E
Q	16	Figure 64	Carrières d'Examilia	37°54'03.1"N	22°56'47.8"E
Q	20	Figure 66	Point A Kenchree	37°53'34.73"N	22°59'43.93"E
Q	21	Figure 66	Point B Kenchree	37°53'8.42"N	22°59'11.97"E
Q	11	Figure 60	Carrière de Mégare A	38° 0'7.99"N	23°16'5.02"E
Q	18	Figure 64	Rachi	37°54'46.75"N	22°59'33.68"E
Q	17	Figure 64	Carrière du Stade	37°59'7.36"N	22°42'32.30"E
Q	23	Figure 68	Carrière d'Argos	37°34'36.87"N	22°35'40.97"E
Q	9	Figure 58	Carrière de Kreusis	38°12'28.48"N	23° 6'37.26"E
Q	8	Figure 57	Carrière de Chorsiai	38°15'23.41"N	22°53'0.35"E
Q	7	Figure 56	Carrière du Ptoin	38°27'33.73"N	23°15'7.96"E
Q	24	Figure 69	Carrière de Leventochori	37°41'21.0"N	21°18'47.5"E
Q	x	x	Carrière du Pirée	37°55'59.2"N	23°38'13.3"E
Q	25	Figure 70	Carrière d'Eleusis	38°02'32.4"N	23°32'08.1"E
Q	10	Figure 59	Carrière de Tanagra	38°18'22.77"N	23°34'51.68"E
Q	x	x	Carrières d'Égine A	37°45'57.3"N	23°28'20.9"E
Q	12	Figure 61	Carrière de Mégare B	x	x
Q	15	Figure 64	Carrière de conglomérat Corinthe	37°54'34.63"N	22°53'23.02"E
Q	19	Figure 65	Carrière du Stade, Isthmia	37°54'47.42"N	22°59'53.50"E

Annexe B2. Synthèse des coordonnées des sites et carrières étudiés. S = site ; Q = carrières.

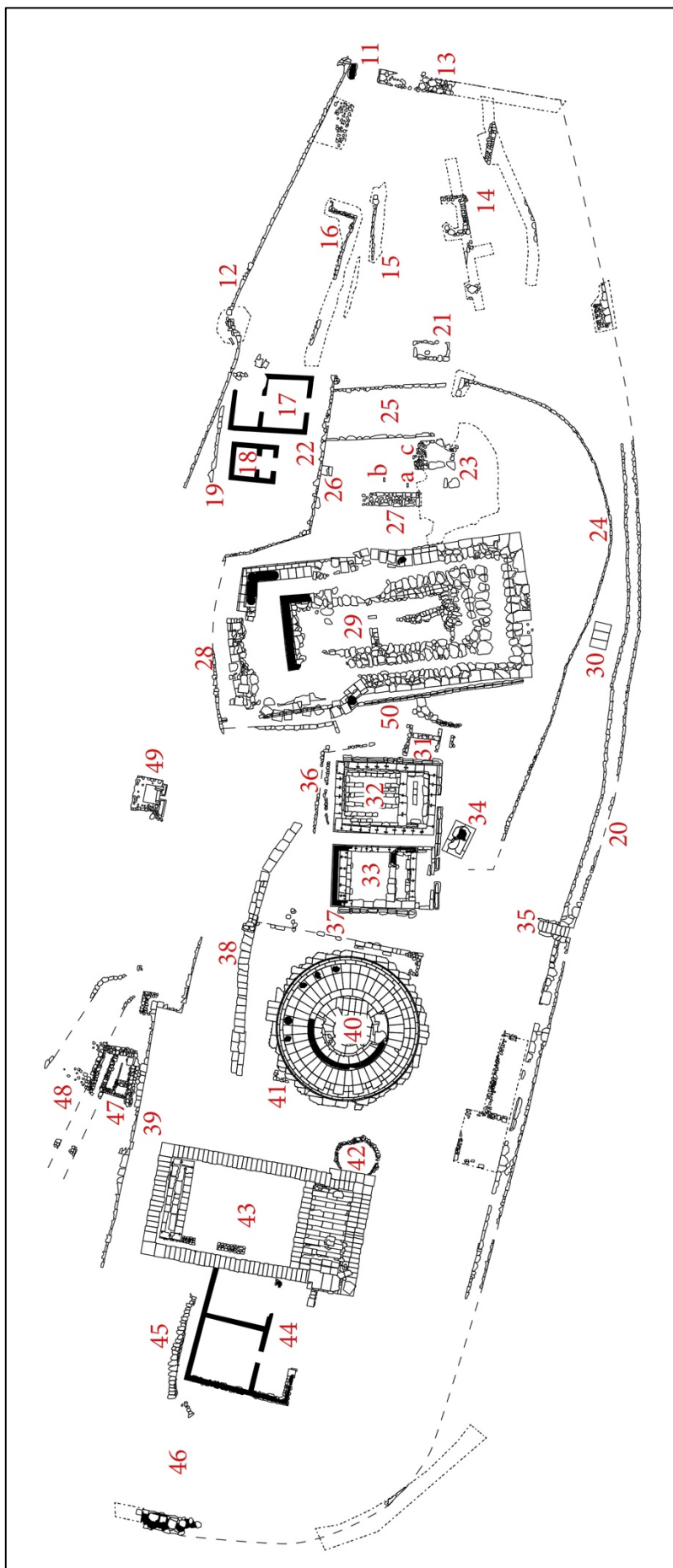
Annexe C : plans de Delphes



Annexe C1. Plan du site de Delphes (Bommelaer et Laroche, 1988)



Annexe C2. Plan du sanctuaire d'Apollon (Bommelaer et Laroche, 2015).



Annexe C3. Le plan du sanctuaire d'Athéna Pronaia, à Delphes (Huber et al., 2022)

Annexe D : variété, utilisation et volume des pierres à Delphes

Monument	N° SD	Type	Utilisation	Classe	Origine	Nature	Volume (m3)	Date
Péribole Sud Marmaria	20	A	E	Conglomérat	Local	Calcaires du Pamasse	660	> 480
Temple en tuf	29	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	350	> 480
Temple en tuf	29	T	E	Travertin	Régional	Travertin	10	> 480
Temple en tuf	29	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	116	> 480
Temple en tuf	29	T	F	Travertin	Régional	Travertin	50	> 480
Trésor dorique	32	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	154	480-373
Trésor dorique	32	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	6	480-373
Trésor éolique	33	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	140	> 480
Trésor éolique	33	T	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	5	> 480
Trésor éolique	33	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Trésor éolique	33	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	10	> 480
Base ou Autel	34	B	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	2	> 480
Base ou Autel	34	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	6	> 480
Mur soutènement	39	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	190	373-323
Tholos	40	T	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	7	480-373
Tholos	40	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	227	480-373
Tholos	40	T	F	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	16	480-373
Tholos	40	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	480-373
Temple en calcaire	43	T	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	236	373-323
Temple en calcaire	43	T	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	40	373-323
Temple en calcaire	43	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	11	373-323
Mur soutènement	45	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	6	373-323
Péribole Ouest Marmaria	46	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	66	> 480
Xyste	52	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	585	373-323
Xyste	52	P	E	Marbre	Régional	Marbre de Livadia	138	Romain
Palestre	52	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	22	373-323
Loutron du Gymnase	52	P	E	Travertin	Régional	Travertin	14	373-323
Xyste	52	P	E	Travertin	Régional	Travertin	202	373-323
Palestre	52	P	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Xyste	52	P	F	Travertin	Régional	Travertin	45	373-323
Agora Romaine	99	P	E	Marbre	Régional	Marbre de Livadia	34	Romain
Péribole Est	100	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	465	> 480
Péribole Sud	101	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	469	> 480
Péribole Sud	101	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	469	> 480
Base du Taureau des Corcyre	104	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	x
Base des Arcadiens	105	B	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	2	373-323
Base des Arcadiens	105	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	2	373-323
Base des Arcadiens	105	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	3	373-323
Bases	106	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	2	373-323
Portique en conglomérat	108	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	12	373-323
Portique en conglomérat	108	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	30	373-323
Portique en conglomérat	108	P	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	103	373-323
Portique en conglomérat	108	P	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	20	373-323
Base "des Navarques"	109	B	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	x
Cheval dourien	111	B	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	x
Epigones et Chefs	112	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	120	> 480
Monument des Rois d'Argos	113	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	120	373-323
Base des Tarentins du bas	114	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	18	> 480
Niches	115	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	22	373-323
Niche ou exèdre	120	B	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	4	323-31
Niche ou exèdre	120	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	1	323-31
Tholos (remployée dans SD 121)	x	T	E	Grès	Allochtone	Grès quartzique	5	> 480
Monoptère (remployée dans SD 121)	x	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Trésor de Sicyone (ex-III)	121	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	140	> 480
Trésor de Siphnos (ex-IV)	122	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	140	> 480
Trésor de Siphnos (ex-IV)	122	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	5	> 480
Base liparéenne	123	B	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	x
Trésor de Thèbes (ex-VI)	124	T	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	225	373-323
Trésor de Thèbes (ex-VI)	124	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Trésor de Thèbes (ex-VI)	124	T	F	Travertin	Régional	Travertin	21	373-323
Péribole Est	200	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	187	> 480

Trésor de Syracuse (?)	203	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Trésor de Syracuse (?)	203	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	21	373-323
Trésor de Syracuse (?)	203	T	F	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	9	373-323
Analemma	204	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	23	480-373
Escalier de la Dolonie	205	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	40	x
Escalier de la Dolonie	205	A	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	x
Base	207	O	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	4	x
Base double	208	O	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	11	x
Exèdre	210	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	8	480-373
Base des Béotiens	211	B	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	1	373-323
Base des Béotiens	211	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	3	373-323
Base des Béotiens	211	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	7	373-323
Base	213	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	1	373-323
Base	213	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	2	373-323
Base étolienne	215	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	2	323-31
Trésor anonyme (ex-V)	216	T	F	Calcaire tendre	Allochtone	Calcaire coquillier	10	> 480
Trésor anonyme (ex-V)	216	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	10	> 480
Mur des Mégariens	217	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	20	480-373
Mur des Mégariens	217	A	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	5	373-323
Base ou fondations	218	B	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	1	x
Trésor de Cnides	219	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	105	> 480
Trésor (ex-XXV)	219	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	18	> 480
Terrasse du Trésor des Athéniens	220	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	11	> 480
Bouleutérion	221	P	F	Grès	Allochtone	Grès bioclastique	10	> 480
Bouleutérion	221	P	F	Calcaire tendre	Local	Flysch	1	> 480
Bouleutérion	221	P	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	3	> 480
Trésor des Athéniens (ex-XI)	223	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	154	> 480
Trésor des Athéniens (ex-XI)	223	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	42	> 480
Trésors (ex-XIa)	224	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	2,7	> 480
Base de Marathon	225	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	3	> 480
Trésor des Phocidiens (ex-VII)	226	T	F	Grès	Allochtone	Grès détritique marin	12	> 480
Trésor (ex-VIII)	227	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	10	> 480
Trésor (ex-IX)	228	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	70	> 480
Péribole Ouest	231	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	24	> 480
Analemma	235	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	19	> 480
Trésor de Cyrène (ex-XIV)	302	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	140	323-31
Trésor de Cyrène (ex-XIV)	302	T	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	65	323-31
Trésor de Cyrène (ex-XIV)	302	T	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	45	323-31
Trésor (ex-XVI)	303	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	10	480-373
Niche analemma	304	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	27	373-323
Trésor (ex-XV)	306	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Trésor de Corinthe (ex-XXIV)	308	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	2	> 480
Angle de fondation	308	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	2	> 480
Trésor (ex-XXIII)	310	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	1	> 480
Exèdre	312	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	3	323-31
Exèdre	312	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	3	323-31
Portique de Athéniens	313	P	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	4	> 480
Portique des Athéniens	313	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	18	> 480
Portique de Athéniens	313	P	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	6	> 480
Base d'Attale II	317	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	323-31
Base de l'Aire	319	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	x	323-31
Colonne des Naxiens	328	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	10	> 480
Mur polygonal	329	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	1398	> 480
Fontaine des Muses	332	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Monument en abside (ex-XXIX)	336	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	5	> 480
Oikos ex-XXVII	337	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	2	> 480
Oikos ex-XXII	338	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	2	> 480
Niche (asclepieion ?)	339	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	24	373-323
Fontaine de l'Asclepieion	340	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Fontaine de l'Asclepieion	340	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	1	373-323
Aqueduc de l'Asclepeion	341	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	10	> 480
Trésor étrusque (ex-X) (Spina ?)	342	T	F	Grès	Allochtone	Grès bioclastique	10	> 480

Trésor (ex-XXI)	345	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	15	> 480
Péribole Ouest	346	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	45	> 480
Péribole Ouest	346	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	45	> 480
Pilier des Messéniens	348	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	7	480-373
Pilier triangulaire	349	O	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	7	480-373
Péribole Est	400	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	132	> 480
Oikos d'Attale	402	T	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	53	323-31
Oikos d'Attale	402	T	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	24	323-31
Oikos d'Attale	402	T	F	Calcaire tendre	Local	Flysch	10	323-31
Oikos d'Attale	402	T	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	50	323-31
Exèdre	403	P	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	177	323-31
Pilier d'Eumène II	404	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	x	323-31
Pilier du Char des Rhodiens	406	O	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	88	323-31
Pilier du Char des Rhodiens	406	O	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	37	323-31
Trépied de Platées	407	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	1	480-373
Trépied de Platées	407	O	F	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	2	480-373
Trépied crotoniate	408	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	2	> 480
Trépied crotoniate	408	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	22	> 480
Base des Tarentins du haut	409	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	6	480-373
Base de l'Apollon de Salamine	410	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	10	> 480
Pilier étolien d'Eumène II	416	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	20	323-31
Autel de Chios	417	B	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	19	323-31
Autel de Chios	417	B	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	21	323-31
Autel de Chios	417	B	F	Calcaire dur	Local	Calcaires du Parnasse	100	323-31
Pilier de Paul Emile	418	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	17	323-31
Pilier du roi Persée	421	O	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	15	323-31
Temple d'Apollon du IVe	422	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	1760	373-323
Temple d'Apollon du IVe	422	T	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	4720	373-323
Temple d'Apollon du IVe	422	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	25	373-323
Temple d'Apollon du IVe	422	T	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	x	373-323
Base ronde	426	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	18	x
Oikos ex-XXX (?)	427	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	2	> 480
Oikos ex-XXX (?)	427	T	F	Calcaire dur	Local	Calcaires du Parnasse	1	> 480
Trésor (ex-XX)	428	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	1	> 480
Trésor (ex-XX)	428	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	3	> 480
Oikos (ex-XXXI)	432	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Base de l'Etolie	436	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	2	373-323
Portique Ouest	437	P	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	475	373-323
Portique Ouest	437	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	16	373-323
Portique Ouest	437	P	E	Travertin	Régional	Travertin	85	373-323
Portique Ouest	437	P	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	80	373-323
Portique Attale	502	P	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	545	373-323
Portique d'Attale	502	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	30	373-323
Portique d'Attale	502	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	30	373-323
Autel (ex-base)	503	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	47	373-323
Autel (ex-base)	503	B	F	Travertin	Régional	Travertin	68	373-323
Trésor (ex-XVII) anonyme	506	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Trésor (ex-XVII) anonyme	506	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	> 480
Base dans l'enclos de Neoptolème	507	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	3	373-323
Base dans l'enclos de Neoptolème	507	B	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	1	373-323
Base dans l'enclos de Neoptolème	507	B	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Enclos de Neoptolème	507	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	22	373-323
Enclos de Neoptolème	507	P	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	13	373-323
Base des Corcyréens	508	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	15	480-373
Colonne d'Acanthe	509	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	5	373-323
Colonne d'Acanthe	509	O	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	7	373-323
Colonne d'Acanthe	509	O	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	7	373-323
Mur polygonal ancien	510	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	40	> 480
Mur polygonal ancien	510	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Parnasse	40	> 480
Enclos de Daochos	511	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	18	373-323
Base en fer à Cheval	514	B	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	11	323-31
Analemma (Cassotis ?)	516	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	15	480-373
Offrandes des Deinomérides	518	B	E	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	8	480-373

Apollon Sitalcas ou Char Batos	521	O	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire rose	16	480-373
Analemma	522	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	10	373-323
Pilier de Prusias	524	O	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	23	373-323
Analemma (monument de Liaia)	526	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	11	373-323
Iskhegaon	529	A	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Trésor du théâtre (ex-XVIII, droite)	531	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	105	480-373
Trésor du théâtre (ex-XIX, gauche)	532	T	F	Grès	Allochtone	Dune oolithique	115	480-373
Base de l'Aurige ou "Poteidanion"?	535	B	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	10	480-373
Analemma	537	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	41	373-323
Orchestra	538	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	77	373-323
Bâtiment de Scène	539	P	F	Conglomérat	Local	Brèche de pente	51	373-323
Niche de Cratéros	540	P	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	62	373-323
Mur de l'escalier du théâtre	541	A	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Escaliers du théâtre	541	A	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	x	373-323
Analemma (s'appuie sur 540)	542	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	30	323-31
Péribole Est	600	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	146	> 480
Analemma	604	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	25	373-323
Lesché des Cnidiens	605	P	E	Grès	Allochtone	Grès spécial	14	480-373
Lesché des Cnidiens	605	P	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	10	480-373
Monument en L (Cassotis)	609	P	E	Calcaire dur	Régional	Calcaire de St Elie	65	323-31
Théâtre	612	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	1642	323-31
Péribole Nord	615	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	110	> 480
Théâtre et analemma	617	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	382	323-31
Fontaine archaïque avant stade	801	P	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	4	>480
Stade	802	P	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	1571	Romain
Terrasse sud du Trésor des athéniens	225bis	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire rose	11	>480
Mur au sud du PO	x	A	E	Conglomérat	Local	Brèche de pente	235	373-323
Stade, mur sud	x	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaires du Pamasse	855	323-31
Bases isolées	x	B	E	Grès	Allochtone	Grès rouge	2	x
Blocs dans les parkings	X	B	E	Calcaire dur	Allochtone	Pierre noire	5	x
Aristainéta	x	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	13	323-31
Charixénos	x	O	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	13	323-31
Heroon de Blum	x	P	E	Travertin	Régional	Travertin	x	Romain
Temple d'Apollon du VIe	x	T	E	Grès	Allochtone	Dune oolithique	5180	> 480
Temple d'Apollon du VIe	x	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	x	> 480
Trésor éolique anonyme	x	T	E	Marbre	Allochtone	Marbre blanc	140	480-373
Blocs dans le parking	x	T	E	Calcaire tendre	Allochtone	Calcaire coquillier	2	x
Péribole est	100	A	E	Calcaire dur	Local	Calcaire à rudistes	70	>480

Annexe D1. Tableau des volumes de roches, selon l'utilisation et le type des monuments à Delphes. Le numéro SD correspond au numéro attribué dans le Guide de Delphes (Bommelaer et Laroche, 2016) et repris dans les annexes C2 et C3.

Annexe E : glossaire géologique

Le glossaire reprend uniquement les termes employés dans le corps de la thèse : le but est de faciliter la compréhension de mes travaux pour les non spécialistes de géologie. Les définitions sont reprises de l'ICOMOS (2008), pour les figures d'altération, ou de dictionnaires de sciences de la terre : par exemple, l'ouvrage de Flügel (2004). Les erreurs, de traduction ou de retranscription, sont donc les miennes.

Altération : modification du matériau n'impliquant pas nécessairement une dégradation de ses caractéristiques du point de vue de la conservation (ICOMOS, 2008).

Alvéolisation : formation, à la surface de la pierre, de cavités (alvéoles) variables en forme et taille (souvent centimétrique, parfois métrique), et qui peuvent être interconnectées (ICOMOS, 2008).

Arénite : désigne une roche sédimentaire détritique donc les grains mesurent entre 64 microns et 2 millimètres.

Benthique : adjectif pour désigner les organismes fixés, enfouis, ou qui vivent à la surface du sédiment, dans les milieux marins.

Bioclaste : fragment fossile d'organismes vivants.

Bioherme : complexe récifal formé par des organismes constructeurs.

Boundstone : d'après la classification de Dunham (1962), désigne les dépôts carbonatés autochtones, dont les éléments sont liés entre eux pendant le dépôt (construit, comme les récifs coralliens).

Brèche : voir *Conglomérat*.

Calcaire : roche composée à plus de 50% de calcite.

Calcarénite : roche sédimentaire composée de grains entre 64 microns et 2 millimètres, dont les grains et la matrice sont majoritairement calcaires.

Calcisphère : petites sphères calcitiques d'origine potentiellement algale.

Calcrète : ou caliche, sol ou horizon carbonaté formé dans des conditions semi-arides, par précipitation de carbonates.

Clast-supported : voir *Conglomérat*.

Conglomérat : roche détritique composée d'éléments de taille supérieure à 2 millimètres. Si les clastes sont anguleux, on parle d'une *brèche* ; si les clastes sont ronds, on parle d'un *poudingue*. Si les clastes ont tous la même nature, on parle d'un conglomérat monogénique, sinon il est polygénique. Si les clastes se touchent entre eux, on dit qu'il est *clast-supported* ; sinon, il y a plus de matrice que de clastes et il est *mud-supported*.

Diaclase : discontinuité dans la roche, dont les lèvres sont jointives et qui ne présentent aucune trace de mouvement relatif cisailant. Généralement perpendiculaire aux bancs, elles peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de long.

Encroûtement : couche superficielle compacte, dure et adhérente. La morphologie superficielle et la couleur sont habituellement différentes de celles de la pierre (ICOMOS, 2008).

Érosion : disparition de la surface originelle de la pierre, conduisant à des contours émoussés (ICOMOS, 2008).

Faciès : type de roche, défini par un ensemble de propriétés (assemblage minéralogique, chimique, paléontologique particulier, texture (taille, forme, lien entre les minéraux ou grains), couleur, qui reflètent ses conditions de formation.

Floatstone : dans la classification de Duhnam (1962), roche composée de gros grains (supérieurs à 3 cm), qui représentent plus de 10% de la roche mais sont non jointifs, dans une boue carbonatée (micrite).

Flysch : formation sédimentaire détritique caractérisée par une alternance marno-calcaire, déposée dans un bassin profond à l'avant des montagnes.

Foraminifères : organismes unicellulaires microscopiques, majoritairement marins, qui forment un test calcaire (coquille) et composent une grande partie des sédiments.

Grainstone : dans la classification de Dunham (1962), roche dont les éléments constitutifs ne sont pas liés entre eux lors du dépôt, mais sont jointifs et ne contient pas de boue (micrite).

Karst : structure formée par l'écoulement souterrain et la dissolution de roche, créant des conduits. Il désigne une morphologie particulière (paysage ou zone karstique) mais aussi des structures plus petites.

Lapiaz : figure de dissolution de surface des calcaires, rainures ou incisions superficielles.

Lithoclaste : fragment de roches, qui remanié qui peut former de nouvelles roches sédimentaires.

Lumachelle : désigne une roche sédimentaire détritique et carbonatée, composée d'une accumulation d'organismes fossiles entiers ou brisés, correspondant à plus de 50% de la roche.

Matrice : désigne le matériel interstitiel entre les grains les plus gros (cristaux, fragments).

- **Micritique** : composée de micrite, de la calcite microcristalline (<4 microns) ou boue carbonatée, lui donnant un aspect sombre en lame mince.
- **Sparitique** : composée de sparite, de la calcite grossière, dont les cristaux sont visibles en lame mince.
- **Microsparitique** : composée d'une sparite fine, comprise entre 5 et 20 microns.

Micrite : voir *Matrice*.

Monogénique : voir *Conglomérat*.

Mudstone : d'après la Classification de Dunham (1962), roche qui comporte moins de 10% de grains, dont les éléments ne sont pas liés entre eux pendant le dépôt, dans une matrice micritique (boue).

Mud-supported : voir *Conglomérat*.

Néritique : adjectif pour désigner ce qui provient des eaux peu profondes, proches des côtes et jusqu'à 200 mètres de profondeur, dans la zone encore accessible à la lumière.

Ooïde : voir *Oolithe*.

Oolithe : roche composée majoritairement d'ooïdes, des structures sphériques formées de laminations concentriques se développant autour d'un nucléus (minéral, fragment biologique) dans des milieux marins peu profonds.

Patine : modification chromatique superficielle, résultant d'une altération naturelle ou artificielle et n'impliquant généralement pas de dégradation superficielle visible (ICOMOS, 2008).

Packstone : d'après la classification de Dunham (1962), roche dont les grains sont jointifs, non liés entre eux lors du dépôt, qui contient donc une proportion importante de grains, dans une boue carbonatée (micrite).

Planctonique : adjectif pour désigner les organismes qui vivent dans la colonne d'eau et qui se déplacent avec le courant.

Plateforme carbonatée : environnement de dépôt caractérisé par une faible profondeur et une sédimentation calcaire (calcaires autochtones, formés par l'accumulation de sédiments, des organismes récifaux ou lagunaires).

Pélagique : adjectif pour désigner la haute mer (hors fonds marins et côtes).

Péloïde : grain rond, sans structure, de petite taille, composé de boue (micrite).

Poudingue : voir *Conglomérat*.

Radiolarite : désigne une roche sédimentaire compacte siliceuse.

Rudistes : famille de mollusques appartenant au groupe des bivalves, de la fin du Jurassique au début du Crétacé. Ils possèdent des valves asymétriques, ce sont des organismes benthiques fixés au sol par leur grande valve, la petite forme un opercule.

Stylolithe : surface irrégulière, résultant de la dissolution de la roche suite à de fortes pressions (origine sédimentaire ou tectonique). Les résidus de dissolution que l'on peut trouver dans le joint sont constitués généralement d'argiles ou de matières organiques. Les stylolithes se classent selon leur géométrie et leur relation au litage.

Sparite : voir *Matrice*.

Turbidite : dépôt sédimentaire par les courants turbiditiques (courants formés par des différences de densités).

Wackestone : d'après la classification de Duhnam (1962), roche carbonatée avec plus de 10% de grains, dans une matrice micritique, dont les éléments ne sont pas liés entre eux pendant le dépôt.