N° d'ordre : 03/DSTU/2026

MEMOIRE

Présenté

À

L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Pour obtenir

LE DIPLÔME DE MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité

Géo-Ressources

Par

BENABBOU Ilhem

Etude qualitative d'un gisement d'une roche ornementale : Exemple gisement de HONAINE."

Soutenu le 30 septembre 2026 devant les membres du jury :

Fatiha HADJI, MC (A), Univ. Tlemcen	Présidente
Choukri SOULIMANE, MC (A) Univ. Tlemcen	Encadreur
MAHBOUBI Salamat MC(A) Univ. Tlemcen	Co-encadreur
BENSEFIA Kamar-Eddine, MC (A) Univ. Tlemcen	Examinateur

Dédicace

Louange à Allah, par la grâce duquel s'accomplissent les bonnes œuvres, et qui m'a donné la force et la patience d'arriver jusqu'à ce jour. À notre Prophète Muhammad ﷺ, modèle de miséricorde, de patience et de fidélité aux principes. À ma mère, mon premier amour, mon soutien et ma plus belle prière, à qui je dédie le fruit de ce travail, car une grande part de cette réussite lui revient. À mes sœurs, compagnes de vie et chaleur de mon cœur, et à ma famille, mon soutien et mon refuge, merci pour votre amour, votre présence et vos prières. À Gaza, à ses enfants, ses mères, ses martyrs et ses blessés, à chaque cœur meurtri qui continue malgré tout à s'accrocher à l'espoir. À cette terre qui nous rappelle que certaines batailles ne se livrent pas seulement sur les champs de guerre, mais aussi dans les consciences, dans les universités, dans les paroles et dans les principes auxquels nous choisissons de rester fidèles. À Saleh Jaafarawi et Anas Al-Sharif, qui nous ont rappelé que transmettre la vérité est une responsabilité et que la parole peut devenir une position. À moi-même, qui ai connu la fatigue, la peur et les larmes, mais qui n'ai jamais abandonné. Ce travail est le fruit de mes efforts, de mes prières, de mes espoirs et de chaque nuit où j'ai continué malgré le doute. **À tous ceux que j'aime et qui ont laissé une empreinte dans mon cœur, je dédie ce travail avec tout mon amour et toute ma gratitude.

Table des matières

Dédicace

Table des matières 1

Remerciements 4

Résume 5

Abstract 6

ملخص 7

Premier chapitre : CADRE GENERAL DE L'ETUDE 8

I. INTRODUCTION 8

II.PROBLEMATHIQUE 8

III.OBJECTIFS DU MEMOIRE 8

IV.CONTEXTE GEOGRAPHIQUE 9

A.Contexte géographique des Monts de Tlemcen 9

V.CONTEXTE GEOLOGIQUE 10

A.Contexte géologique de bassin des Monts de Tlemcen 10

1.Sur le plan stratigraphique 10

1.1.Le socle 10

1.2.La couverture 10

2.Sur le plan structural 13

B.Contexte géologique des Monts de Traras 14

1.Sur le plan stratigraphique 14

1.1.Primaire 14

1.2.Le secondaire 14

2.Sur le plan structural 15

VI.METHODOLOGIE DE TRAVAIL 16

A.Travaux de terrain 16

B.Travaux de laboratoire 16

Deuxième chapitre : ETUDE LITHOLOGIQUE DE LA CARRIERE 17

I.INTRODUCTION 17

II.LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA CARRIERE 17

III.ETUDE LITHOLOGIQUE DE LA CARRIERE 18

A.Gradin inférieur 18

B.Gradin supérieur 19

IV.ETUDE QUALITATIVE 20

A.Marbre à nuance rougeâtre 20

B.Marbre à nuance grisâtre 21

C.Marbre à nuance noirâtre 21

Troisième chapitre : ETUDE QUALITATIVE DE GISEMENT 22

I.INTRODUCTION 22

II.CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE 22

A.Essai physique 23

1.Masse volumique apparente et porosité ouverte 23

1.1.Principe de l'essai 23

1.2.Résultats 24

2.Coefficient d'absorption d'eau par capillarité 25

2.1.Principe de l'essai 25

2.2.Résultats 25

3.Détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique 27

3.1.Principe de l'essai 27

3.2.Résultats 27

4.Vitesse de propagation du son 28

4.1.Principe de l'essai 28

4.2.Résultats 28

B.Essai mécanique 30

1.Essai de compression 30

1.1.Principe de l'essai 30

1.2.Résultats 30

2.Résistance à la rupture par flexion 32

2.1.Principe de l'essai 32

3.Résistance à l'usure 34

3.1.Principe de l'essai 34

3.2.Résultats 34

4.Détermination de la résistance aux chocs thermique 35

4.1.Principe de l'essai 35

4.2.Résistance à la rupture par flexion 35

5.Vitesse de propagation du son 36

6.Résistance à la flexion 39

III.ETUDE GEOCHIMIQUE 40

CONCLUSION GENERALE 41

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 44

LISTE DES FIGURES 46

LISTE DES TABLEAUX 47

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est très agréable de pouvoir exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté leur contribution, leur aide et leur soutien, durant la réalisation de ce manuscrit. Ma pensée s'adresse aux personnes suivantes :

En premier lieu, qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde reconnaissance à Madame HADJI Fatiha, Maitres de Conférences, classe A à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens également à remercier Monsieur SOULIMANE Choukri, Maitres de Conférences, classe A à l'Université de Tlemcen, pour m'avoir proposé ce sujet. J'ai beaucoup appris de lui, je le remercie pour le temps qu'il a consacré pour lire et corrigé le manuscrit avec patience et rigueur au fur et à mesure de sa rédaction. Ses critiques et ses conseils ont été riches d'enseignement. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame MAHBOUBI Salamet, Maitres de Conférences, classe A à l'Université de Tlemcen. Je la remercie pour sa gentillesse, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils durant toute la période de mon travail.

Une mention spéciale est accordée à Monsieur BENSEFIA Kamar Eddine, Maitres de Conférences, classe A à l'Université de Tlemcen et Chef de Département des Sciences de la Terre et de l'Univers. Je le remercie pour son accompagnement et son aide lors de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier notre responsable de Master Géo-ressources Professionnel Mr. MAROK Abbas, Professeur à l'université de Tlemcen, pour tous ses efforts durant mes années de formation.

Que Monsieur DERAKOUI Mohammed « Chef d'exploitation -**ENG** Honaine » reçoit mes sincères reconnaissances pour les conseils judicieux sur le terrain et pour son chaleureux accueil au sein de la carrière « El Kaada » ; de nous avoir fourni des informations concernant ce gisement.

De nombreuses personnes qui, par leur aide technique ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Nous tenons à leur exprimer notre profonde gratitude

Résumé

Cette étude porte sur la caractérisation de la roche ornementale exploitée dans la carrière d'El Kaada, située à Honaïne, dans les Monts des Traras, wilaya de Tlemcen.

L'objectif est d'étudier ses caractéristiques géologiques, lithologiques, physico-mécaniques et géochimiques afin d'évaluer son potentiel de valorisation.

Les observations de terrain ont permis d'identifier trois lithofaciès : marbre rougeâtre, grisâtre et noirâtre, présentant des différences de couleur, de fracturation et de présence de calcite. Les essais physico-mécaniques montrent une bonne compacité, une faible porosité et une faible absorption d'eau. La résistance moyenne à la compression est de 93 MPa et celle à la flexion de 16,65 MPa. Après choc thermique, une diminution de la vitesse ultrasonique et de la résistance à la flexion est observée.

L'analyse géochimique confirme la nature fortement carbonatée de la roche, principalement liée à la calcite.

Ces résultats indiquent un intérêt pour son utilisation comme pierre ornementale.

Mots clés : El Kaada, Honaïne, Monts des Traras, lithofaciès, marbre, pierre ornementale, propriétés physico-mécaniques, choc thermique, analyse géochimique, calcite.

Abstract

This study focuses on the characterization of the ornamental rock exploited in the El Kaada quarry, located in Honaïne, in the Traras Mountains, Tlemcen Province.

The objective is to investigate its geological, lithological, physico-mechanical and geochemical characteristics in order to assess its potential for valorization.

Field observations identified three lithofacies: reddish, greyish and blackish marble, differing in color, fracturing and calcite occurrence. Physico-mechanical tests show good compactness, low porosity and low water absorption.

The average compressive strength is 93 MPa, while the average flexural strength is 16.65 MPa. After thermal shock, a decrease in ultrasonic velocity and flexural strength was observed. Geochemical analysis confirms the highly carbonate-rich nature of the rock, mainly associated with calcite.

These results indicate that the material has potential for use as an ornamental stone.

Keywords: El Kaada, Honaïne, Traras Mountains, lithofacies, marble, ornamental stone, physico-mechanical properties, thermal shock, geochemical analysis, calcite.

ملخص

تتناول هذه الدراسة توصيف الصخور الزخرفية المستغلة في محجرة القعدة، الواقعة بمنطقة حونين، ضمن جبال ترارة بولاية تلمسان. تهدف الدراسة إلى تحديد الخصائص الجيولوجية والليثولوجية والفيزيائية-الميكانيكية والجيوكيميائية للصخر، من أجل تقييم إمكانية تثمينه.

سمحت الملاحظات الميدانية بتحديد ثلاثة أنماط ليثولوجية: رخام مائل إلى الأحمر، ورخام مائل إلى الرمادي، ورخام مائل إلى الأسود، وتختلف هذه الأنماط من حيث اللون والتشقق ووجود الكالسيت.

أظهرت الاختبارات الفيزيائية-الميكانيكية تماسكاً جيداً، ومسامية منخفضة، وامتصاصاً منخفضاً للماء. بلغ متوسط مقاومة الضغط 93 ميغاباسكال، بينما بلغت مقاومة الانحناء 16.65 ميغاباسكال. وبعد الصدمة الحرارية، لوحظ انخفاض في سرعة الموجات فوق الصوتية ومقاومة الانحناء.

كما أكد التحليل الجيوكيميائي الطبيعة الكربوناتية العالية للصخر، المرتبطة أساساً بالكالسيت. وتشير هذه النتائج إلى إمكانية استعماله كحجر زخرفي.

الكلمات المفتاحية: القعدة، هنين، جبال ترارا، الليثوفاسيات، الرخام، الحجر الزخرفي، الخصائص الفيزيائية-الميكانيكية، الصدمة الحرارية، التحليل الجيوكيميائي، الكالسيت.

.

Premier chapitre :

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

Premier chapitre : CADRE GENERAL DE L'ETUDE

I. INTRODUCTION

L'industrie des roches ornementales joue un rôle important dans le développement socio-économique et répond à une demande croissante en matériaux destinés au bâtiment et à l'aménagement. L'étude des gisements permet de mieux connaître leurs caractéristiques ainsi que leur variabilité.

Notre travail porte sur les carbonates cristallins des Monts des Traras, et plus particulièrement sur le matériau exploité dans la carrière d'El Kaada. Ce matériau est commercialement désigné sous le terme de « marbre ». Cependant, en l'absence d'une étude pétrographique détaillée permettant de préciser sa nature exacte, son interprétation doit rester prudente. Il est ainsi décrit dans cette étude comme un calcaire cristallin ou un calcaire marmorisé, tout en conservant le terme « marbre » lorsqu'il désigne le matériau commercial..

II. PROBLEMATHIQUE

Cette présente étude est consacrée à la caractérisation pétrographique et physico-chimique de la roche ornementale exploitée dans la carrière d'El Kaada par l'entreprise ENG. Actuellement, l'extraction industrielle est menée sans distinction rigoureuse des différentes espèces pétrographiques constituant le site. À cet effet, nous avons jugé utile d'établir une analyse pétrographique détaillée de chacun des lithofaciès inventoriés.

III. OBJECTIFS DU MEMOIRE

L'étude porte sur la qualité pétrographique et physico-chimique de la roche ornementale exploitée dans la carrière d'El Kaada. Les principaux objectifs de ce mémoire sont :

- Déterminer la qualité lithologique de la roche formant le front de taille principal de la carrière à partir d'une coupe lithologique levée en détail ;
- Définir les différentes espèces lithologiques exploitées dans ce gisement ;
- Caractériser la roche objet de l'étude, en se basant sur l'interprétation des paramètres pétro-physique et géochimique de ce gisement.

IV. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

A. Contexte géographique des Monts de Tlemcen

Les Monts de Tlemcen se situent dans la partie nord occidentale du nord algérien à environ 500 Km à l'Ouest d'Alger. Ils sont limités au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par les Hautes Plaines Oranaises, à l'Est par Les Monts de Saïda et enfin à l'Ouest par la frontière algéro-marocaine (Fig. 01).

Par ailleurs, Les Monts des Traras s'inscrivent dans la partie septentrionale des Monts de Tlemcen. Ils sont délimités au Nord par la mer Méditerranée, au Sud par la plaine de Maghnia, à l'Ouest par la frontière algéro-marocaine et enfin à l'Est par les Monts de Sebaa Chioukh.

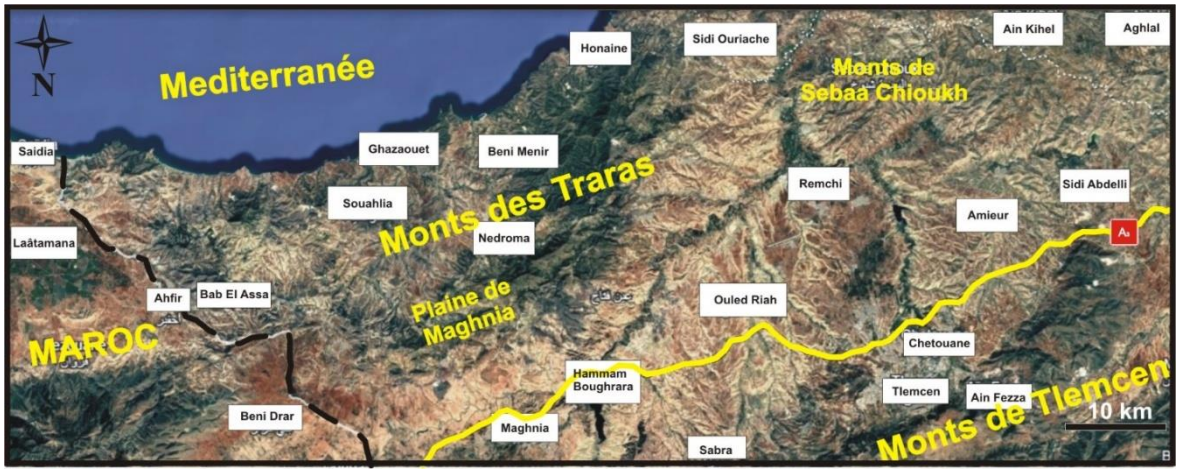


Fig. 1 : Position géographique des Monts de Traras (Google Earth, 2026)

V. CONTEXTE GEOLOGIQUE

A. Contexte géologique de bassin des Monts de Tlemcen

1. Sur le plan stratigraphique

Les Monts de Tlemcen *(s. l.)*, se compose d'un socle paléozoïque et d'une couverture mésozoïque :

1.1. Le socle

Il s'agit d'un socle déformé, métamorphisé, granitisé et érodé. Il est formé essentiellement de pélite, psamite, flysces, granite et de carbonates. Il est observé dans les Monts de Traras et Ghar Roubane.

1.2. La couverture

La couverture sédimentaire des Monts de Tlemcen est représentée de bas en haut par les séries sédimentaires suivantes :

1.2.1. Le Mésozoïque

- **Le Trias**

Il est observé en plusieurs pointements diapiriques répartis dans les Monts de Tlemcen. Il est constitué d'un complexe sédimentaire, formé essentiellement des argiles bariolées, des carbonates, grès, des évaporites et des filons doléritiques qui traverse se complexe.

- **Le Jurassique**

Représenté par trois époques ; Dans l'ensemble nous résumerons les dépôts attribués à cette période comme suit :

- **Jurassique inférieur** : Il débute à la base, par une formation massive formée de calcaire, suivie d'une alternance marno-calcaire riche en faunes, puis de calcaire à silex et de calcaire à Amalthéïdés.
- **Jurassique moyen :** Il comporte moins de fossiles et des calcaires sombres à nombreux silex.

- **Jurassique supérieur** : Cette époque se distingue par des variations spectaculaires des faciès et des épaisseurs. Elle débute par « les argiles de Saida Fm » recouvertes par les « Fm des Grès de Boumedien » (Mégarythme I,). Passant à une succession de plusieurs formation carbonatées « Calcaire de Zarifet, Dolomie de Tlemcen, Marno-calcaire de Raourai, Calcaire de Lato, dolomie de Terni et Marno-calcaire de Hariga » (Mégarythme II).

➢ **Le Crétacé**

Le passage au Crétacé est reconnu dans les Monts de Tlemcen par « les alternances Fm d'Ouled Mimoun » et « Fm des Argiles de Larmoricière ».

1.2.2. Le Cénozoïque

Les dépôts d'ère Cénozoïque montrent :

- **Au cours de Paléogène :** les dépôts sont représentés par une alternance argilo-gréseuse à gastéropodes continentaux « Eocène continental Fm ». Cette dernière formation est surmontée par des marnes, admettant quelques bancs de calcaire datant du Cénomanien supérieur. Sur cet ensemble repose une épaisse dalle carbonatée.
- **Au cours de Néogène :** la sédimentation est représentée par les alternances argilo-gréseuses qui sont bien développées dans les sillons subsident de Margnia-Sidi Bel Abbès « Miocène marin Fm ».

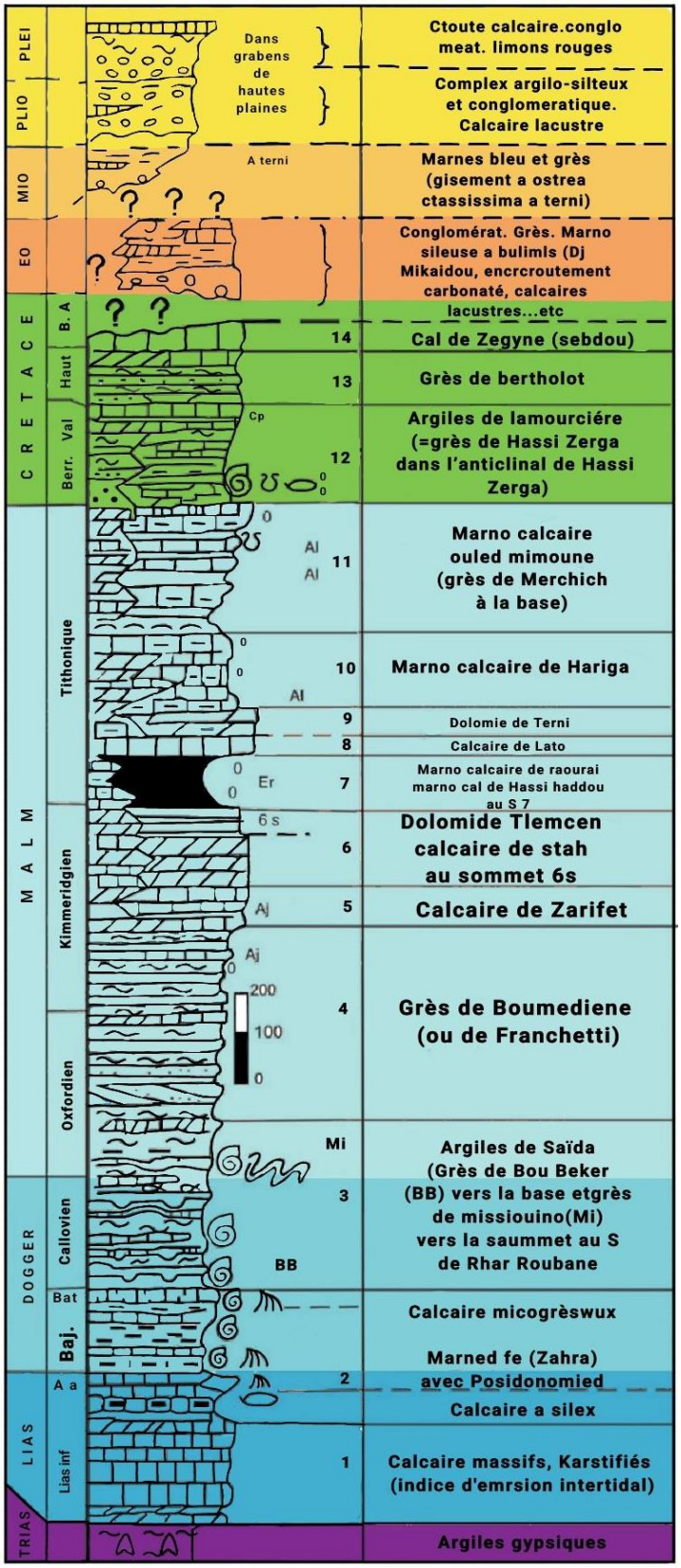


Fig. 2 : Colonne lithostratigraphique synthétique des Monts de Tlemcen

2. Sur le plan structural

Les évènements structuraux des Monts de Tlemcen se résument et se sont déroulé en cinq phases tectoniques ; Phase confus est celle de l'Eocrétacé jusqu'au période récente. Cette dernière est suivie par une phase atlasique marquée essentiellement par des mouvements compressifs et distensifs. Par ailleurs, La troisième phase se caractérise par une phase de compression du socle, généralement de direction N-S à NW-SE. Concernant la quatrième phase est à dominance distensive. Enfin, la dernière phase tectonique (Plio-quaternaire) est marquée des fois par des mouvements compressifs ou distensifs (Benest, 1982).

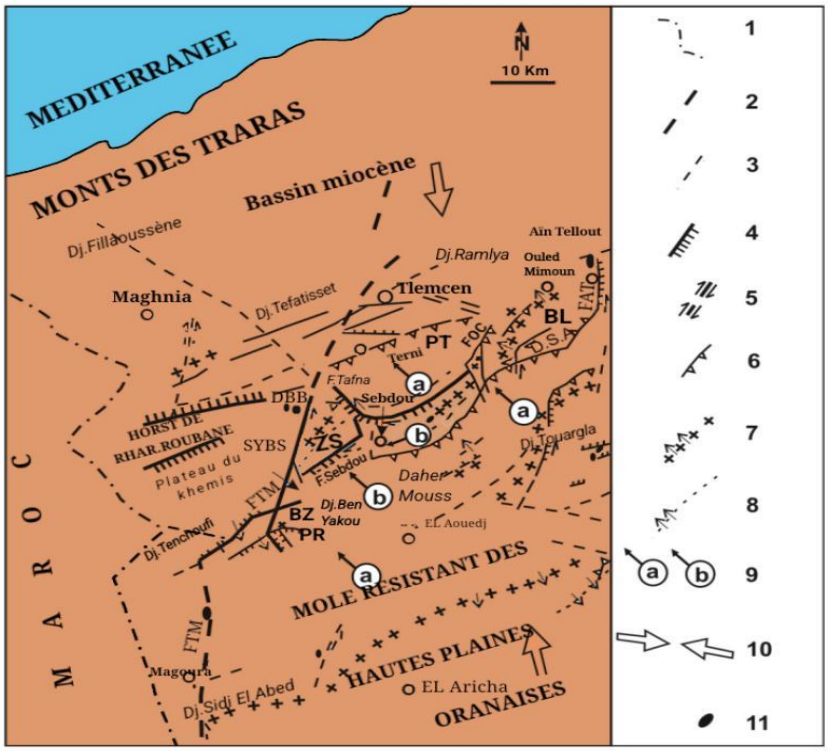


Fig. 3 : Schéma structurale de bassin des Monts de Tlemcen (d'aprés Benest, 1982)

1 : Frontière algéro-marocaine; 2 : Faille majeure; 3 : Faille mineure; 4 : Faille normale ayant joué verticalement; 5 : Sens de décrochement; 6 : Faille inverse ou chevauchante; 7 : Anticlinal (les flèches indiquent la vergence); 8 : Synclinal (les flèches indiquent la vergence); 9 : Sens des principaux chevauchements ou déplacements (premier temps a et deuxième temps b); 10 : Direction moyenne de compression ou de raccourcissement; 11 : Extrusion gypsifère à faciès Keuper; BL : Bloc sigmoïde de Lamoricière; BZ : Djebel Bou Zatatt; DBB : Dépression des Beni Bahdel; DSA : Dépression de Sidi Abdallah; FAT : Décrochement d'Aïn Tellout; FOC : Transversale

d'Oued Chouly; FTM : Transversale Tafna-Magoura; PR : Panneau coulissé du Djebel Raouraïa; PT : Panneau central arqué de Terni; SBYS : Sidi Yahia Ben Sefia; ZS : Zone sigmoïde de Sidi Yahia.

B. Contexte géologique des Monts de Traras

1. Sur le plan stratigraphique

1.1. Primaire

Cette partie est bien détaillée dans la coupe de l'Oued Honaine plus précisément sur la pente occidentale du Ras Ouain (GUARDIA, 1975). Dans l'ordre ascendant, nous distinguerons les unités suivantes :

- La formation pélitique de base « Ordovicien inférieur à moyen » ;
- La formation de psammites biotubés « Ordovicien supérieur » ;
- La formation des pélites à phtanites « Silurien » ;
- La formation flyschoïde à microbrèches et formation des calcaires à Tentaculites « Dévonien » ;
- La formation des dolomies à polypiers et complexe volcano-sédimentaire « Carbonifère inférieur » ;
- Le granite de Nédroma aurait un âge fini Westphalien.

1.2. Le secondaire

Affleurant largement dans les Monts de Traras, la couverture sédimentaire est principalement représentée par :

1.2.1. Le Trias

Il s'agit d'une série détritiques pourprée ; cette dernière recouvre en discordance angulaire le primaire plissé et granitisé.

1.2.2. Le Jurassique

Structuré selon les trois grandes périodes géologiques du Jurassique :

- **Jurassique inférieur :** Début du groupe carbonaté inférieur, marqué par des calcaires compacts (Zaïlou), des calcaires à silex (Tisseddoûra) et des marno-calcaires riches en ammonites (Bayada).
- **Jurassique moyen :** Fin du groupe carbonaté inférieur avec les calcaires à faciès variés des Traras, suivis des marnes de Sekika.

- **Jurassique supérieur :** Dominé par le groupe carbonaté médian (argiles et grès de Saïda) et le groupe supérieur localisé (alternances gréseuses, dolomies et calcaires massifs).

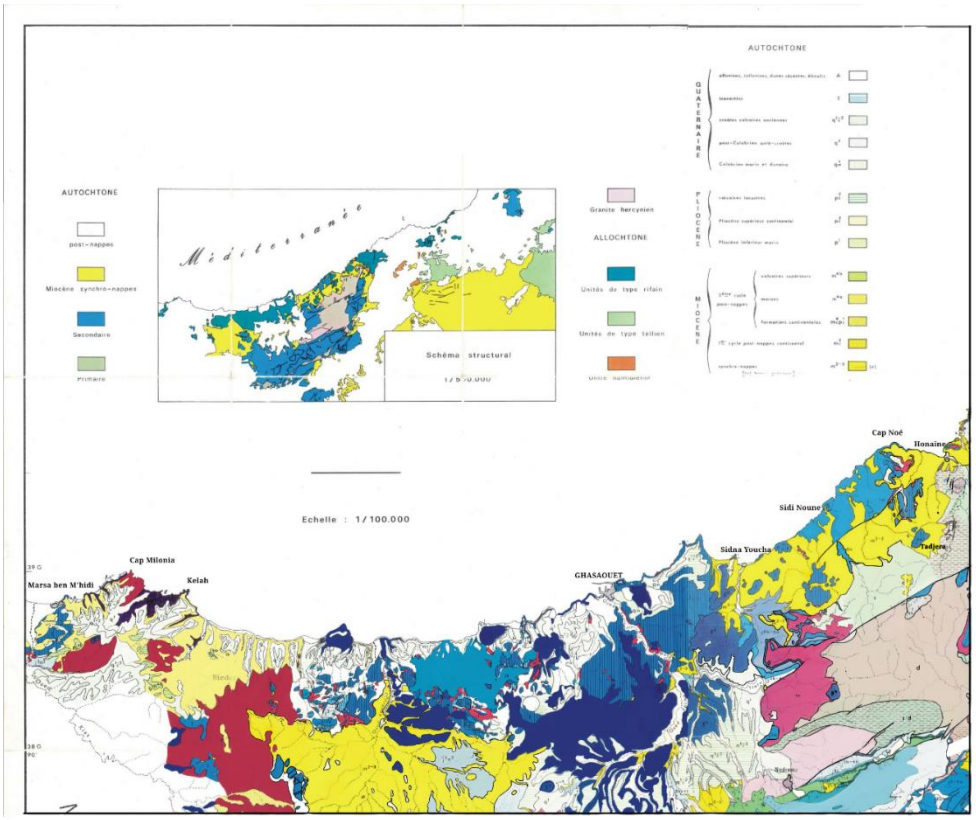


Fig. 4 : Carte géologique des Monts de Traras (d'après Guardia, 1975).

2. Sur le plan structural

Sur le plan structural, les Monts des Traras sont subdivisés en deux principales périodes : la première qui est caractérisée par une tectogénèse pré-atlasique affectant le socle paléozoïque et une deuxième caractérisée par une tectogenèse atlasique affectée par des mouvements d'âge Crétacé supérieur et Miocène (Guardia, 1975). Selon Guardia (1975); Ameur (1988, 1999), les Monts des Traras se caractérisent par une tectonique souple (de direction variable (N10, N20, N90), ainsi qu'une tectonique cassante ; généralement de direction N40 et N90.

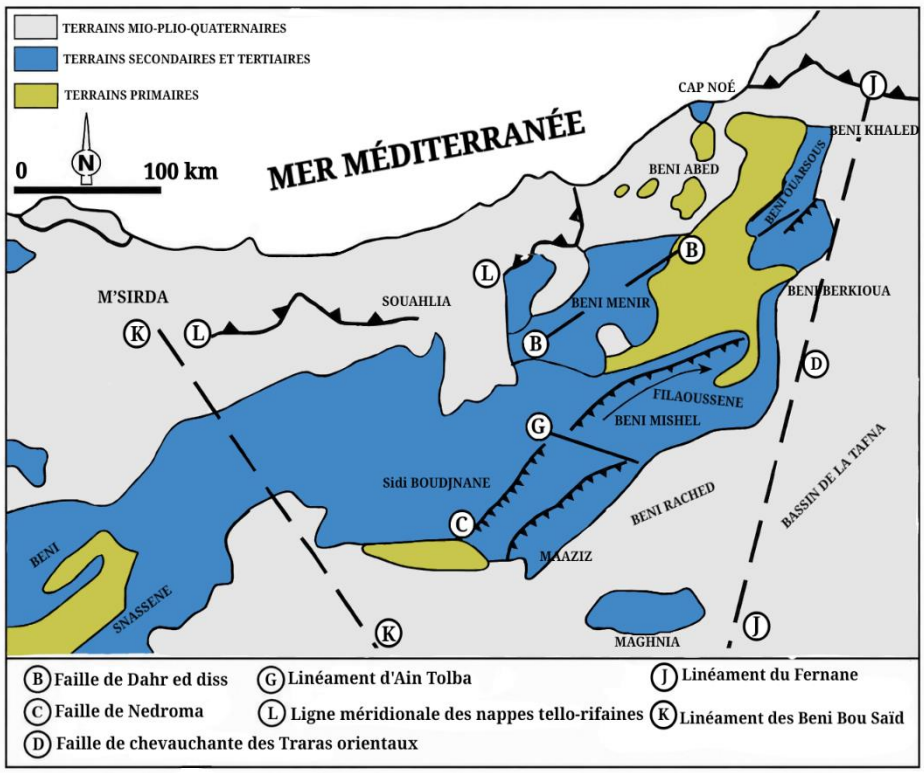


Fig. 5 : Schéma structural des Monts des Traras d'après Guardia, 1975, modifié par Ameur, 1999).

VI. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

A. Travaux de terrain

Les investigations sur le terrain ont consisté à lever deux coupes lithologiques distinctes selon la nature des matériaux étudiés. Des échantillons de taille décimétrique ont été prélevés sur chaque site afin de préparer des sections polies pour des analyses ultérieures.

B. Travaux de laboratoire

Le protocole expérimental en laboratoire s'est articulé autour de la préparation des sections polies ainsi que l'évaluation des paramètres pétrographiques et pétrophysiques. L'acquisition de ces données a été finalisée au niveau du laboratoire de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) à l'unité de transformation de Sig.

Deuxième chapitre :

ETUDE LITHOLOGIQUE DE LA CARRIERE

Deuxième chapitre : ETUDE LITHOLOGIQUE DE LA CARRIERE

I. INTRODUCTION

Afin de déterminer les caractéristiques de ce gisement, cette étude intègre une analyse géologique descriptive et spatiale. Elle comprend dans un premier temps la délimitation géographique du site ainsi qu'une caractérisation géomorphologique tridimensionnelle, appuyée par des descriptions litho-structurales et des levés de deux coupes détaillées

II. LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LA CARRIERE

Le gisement de la roche ornementale de Djebel El Kaada est situé à quelques kilomètres au Sud-Ouest de la ville de Honaine. Ce Djebel fait partie de l'extrémité nord-orientale des Monts des Traras. Il est délimité à l'Est par l'Oued Bou Chaker et à l'Ouest par l'Oued Kioma (Fig. 06).

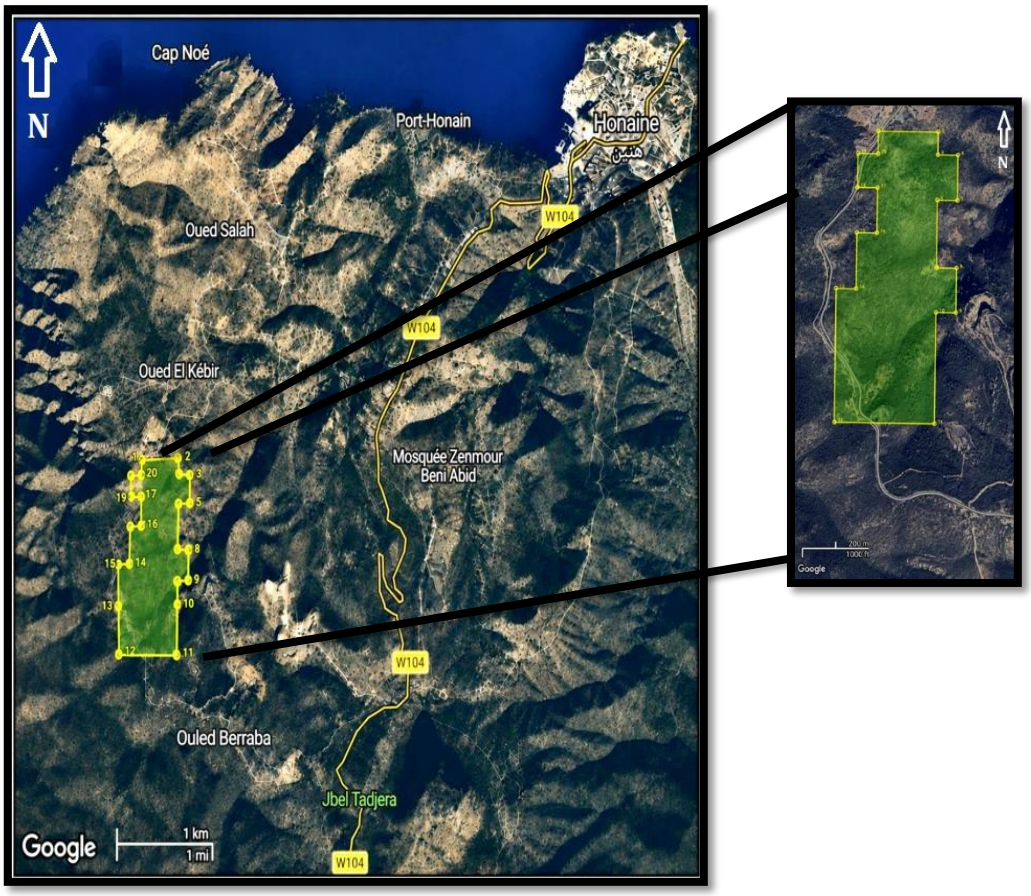


Fig. 6: Image satellitaire montrant le positionnement de la carrière

Les coordonnées UTM du périmètre carré de la carrière sont reportés dans le tableau ci-dessous (Tab. 01).

Tab. 1 : Coordonnées UTM du périmètre carré de la carrière d'El Kaada

COORDONNES DU PERIMETRE UTM NS F30

Borne	X	Y	Borne	X	Y
B1	618800	3891300	**B11**	619100	3890000
B2	619100	3891300	**B12**	618600	3890000
B3	619100	3891200	**B13**	618600	3890600
B4	619200	3891200	**B14**	618700	3890600
B5	619200	3891000	**B15**	618700	3890850
B6	619100	3891000	**B16**	618800	3890850
B7	619100	3890700	**B17**	618800	3891050
B8	619200	3890700	**B18**	618700	3891050
B9	619200	3890500	**B19**	618700	3891200
B10	619100	3890500	**B20**	618800	3891200

III. ETUDE LITHOLOGIQUE DE LA CARRIERE

A. Gradin inférieur

D'une hauteur de 7 m, il est constitué de calcaires marmorisés, en bancs massifs, compacts et mal stratifiés. Ces calcaires cristallins sont à patine sombre et cassure conchoïdale de teinte grisâtre à taches rosâtres. La fissuration est très intense et elle est matérialisée par diaclases et des veinules de calcite multidirectionnelles donnant à la roche un aspect bréchique.

La présence des géodes de calcite est également observée de taille centimétrique dans ces calcaires cristallins.

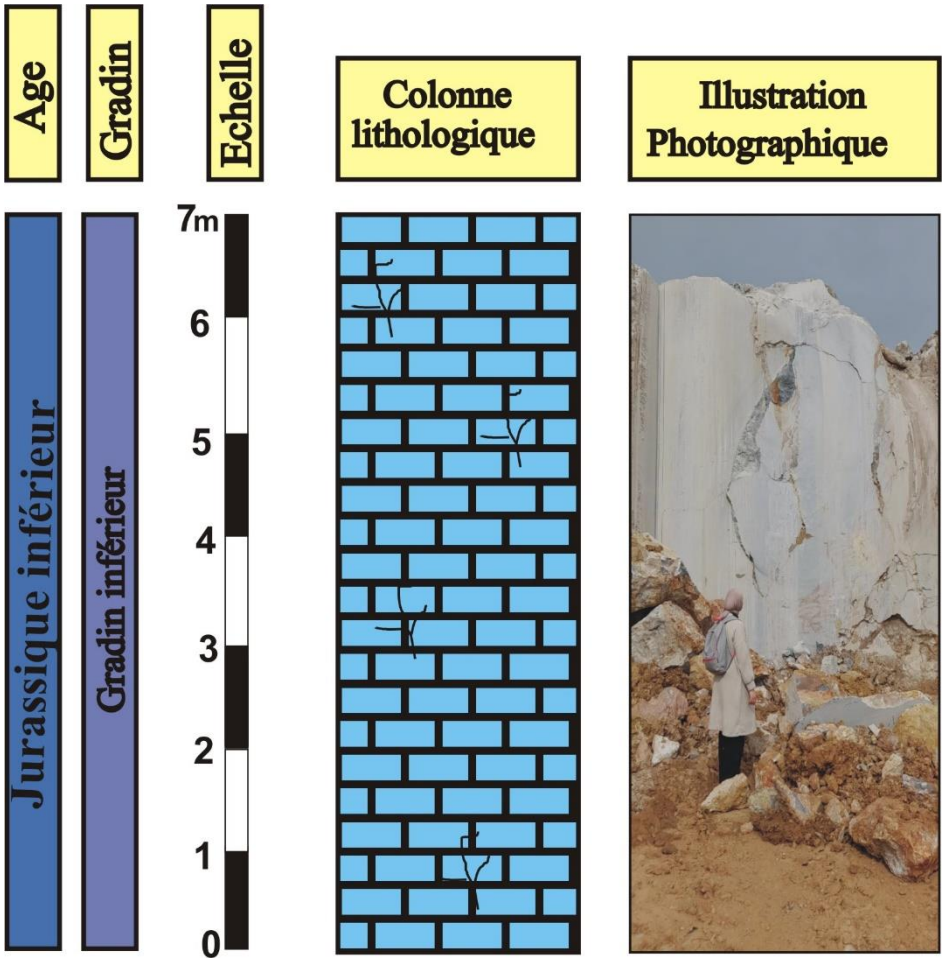


Fig. 7 : Colonne lithologique du gradin inférieur.

B. Gradin supérieur

Il présente une hauteur de 4 m . Comme le gradin inférieur , il est formé par des calcaires cristallins (marmorisés) gris sombre à la patine et gris à taches roses à la cassure, renfermant des géodes de calcite de taille centimétrique. Les bancs se présentent en dalles très mal stratifiées, parcourues par un réseau dense de diaclases et veinules blanchâtres multidirectionnelles. Ces éléments tectoniques (diaclases et veinules) sont responsables de l'aspect bréchique de cette roche.

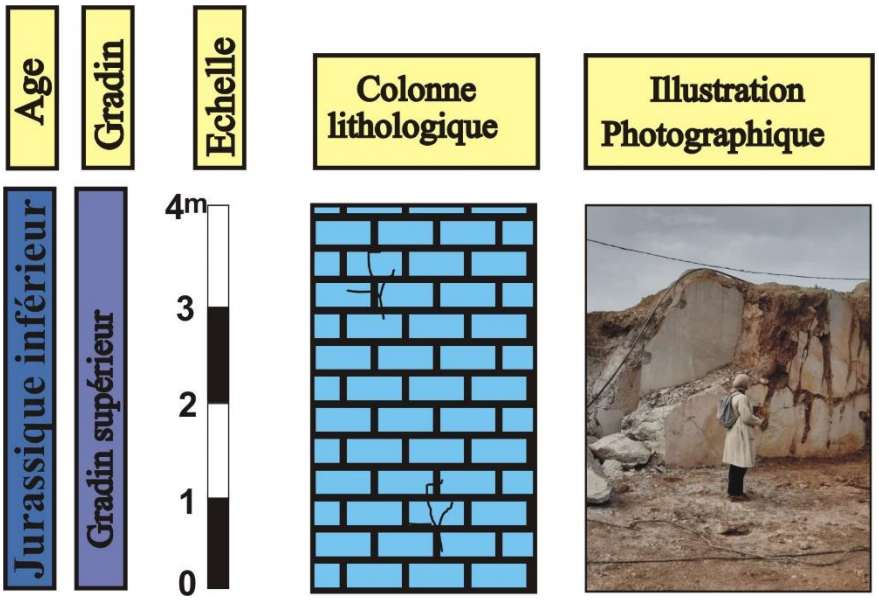


Fig. 8: Colonne lithologique du gradin supérieur.

IV. ETUDE QUALITATIVE

Les variations latérales des lithofaciès carbonatés, nous ont permis d'individualiser trois types de marbre exploité dans ce gisement :

A. Marbre à nuance rougeâtre

Il occupe la partie Est de la carrière. Il correspond à un calcaire cristallin de teinte rougeâtre, caractérisé par l'abondance de géodes de calcite, de taille centimétrique, colmatées par de la calcite.



Fig. 9: Surface polie montrant lithofaciès à nuance rougeâtre

B. Marbre à nuance grisâtre

Il forme la partie médiane de la carrière, où le lithofaciès se trouve compris entre un marbre à nuance rougeâtre à l'Est et un marbre à nuance grisâtre à droite. Affecté par des fissures larges de millimétriques à centimétrique. Elles sont colmatées par un remplissage calcitique.

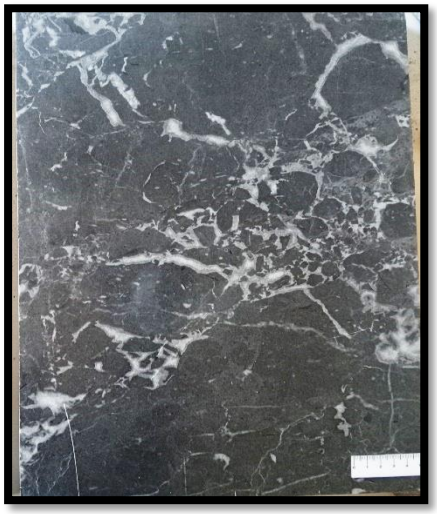


Fig. 10: Surface polie montrant lithofaciès à nuance grisâtre

C. Marbre à nuance noirâtre

Il est caractérisé par un fond noir, traversé par des microfissures millimétriques ou centimétriques, remplies de la calcite ou d'oxyde de fer. Dans ce lithofaciès, on note aussi la présence de quelques géodes de calcite blanche. Ce lithofaciès occupe la partie Nord de front de taille principal de la carrière.



Fig. 11: Surface polie montrant lithofaciès à nuance noirâtre

Troisième chapitre :

ETUDE QUALITATIVE DE GISEMENT

Troisième chapitre : ETUDE QUALITATIVE DE GISEMENT

I. INTRODUCTION

Le dernier chapitre de ce mémoire est dédié à la caractérisation qualitative du dits gisement. La démarche consiste de déterminer et de classifier leurs propriétés pétrographiques, afin d'évaluer leurs caractéristiques physico-mécaniques à partir de données expérimentales de laboratoire. A la fin, une analyse Géochimique a été envisagé par spectrométrie de fluorescence.

II. CARACTERISATION PHYSICO-MECANIQUE

Le présent mémoire a pour objet de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques du matériau étudié conformément aux normes d'essai applicables. Les normes utilisées pour chaque essai sont présentées dans le tableau 02.

Tab. 2 : Les normes appliquées pour les Essais physico-mécanique

Essai physico-mécanique	**La norme appliqué**
La masse volumique apparente et la porosité ouverte	NF EN 1936 est publiée en 2007 et correspond à EN 1936:2006.
L'absorption d'eau par capillarité	NF EN 1925-1999toujours indiquée comme courante par AFNOR
L'absorption d'eau à la pression atmosphérique	NF EN13755-2008
La résistance à la compression	NF EN 1926-2007
La résistance à la flexion sous charge centrée	NF EN 12372-2022
La résistance au choc thermique	NF EN 14066-2013
La vitesse de propagation du son	NF EN 14579-2005
La résistance à l'usure	NF EN 14157-2017
L'analyse chimique	NF EN 196-2-2013

A. Essai physique

Des essais sur un échantillon de pierres naturelles ont été réalisé par **ENG** dont l'objectif de déterminer les caractéristiques physico-mécaniques de ce matériau et ceci conformément aux normes en vigueur.

1. Masse volumique apparente et porosité ouverte

1.1. Principe de l'essai

La masse volumique apparente (ρb) est le rapport entre la masse de l'éprouvette sèche et son volume apparent. La porosité ouverte (P_0), en pourcentage est le rapport entre le volume des pores ouverts et le volume apparent de l'éprouvette.

Après séchage des éprouvettes jusqu'à masse constante, la masse volumique apparente et la porosité ouverte sont déterminées par la méthode d'absorption d'eau sous vide et pesée hydrostatique. La porosité ouverte P_0 est donnée par l'équation suivante :

$$P_0 = (ms - md) / (ms - mh) \times 100$$

Où :

- P0 : Porosité ouverte en % ;
- md : Masse de l'éprouvette sec, en grammes ;
- mh : Masse de l'éprouvette immergée dans l'eau, en grammes ;
- ms : Masse de l'éprouvette saturée, en grammes.

La masse volumique apparente ρb est donnée par l'équation :

$$\rho b = md / (ms - mh) \times \rho rh$$

Avec :

- ρb : Masse apparente en kg/m³ ;
- ρrh : Masse volumique de l'eau à 18°C utilisée pour la pesée hydrostatique en kg/m³.
- ρrh = 998 kg/m³

1.2. Résultats

Les résultats de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous. A cet effet, Les résultats des mesures effectuées selon la norme **NF EN 1936** mettent en évidence une grande homogénéité physique du matériau analysé :

- **Forte densité de matrice :** La masse volumique apparente moyenne est de 2675 kg/m³, avec un écart-type de 20 kg/m³, indiquant une faible dispersion des valeurs.
- **Porosité accessible très faible :** La porosité ouverte moyenne mesurée est de 0,68 % avec un écart-type de 0,53 %. Cette faible valeur traduit une faible proportion de pores accessibles à l'eau dans les conditions de l'essai. Elle constitue un facteur favorable à la durabilité hydrique, mais ne permet pas, à elle seule, de conclure à une excellente résistance au gel-dégel.
- **Comportement hydrique prévisible** La faible porosité ouverte mesurée traduit une faible proportion de pores accessibles à l'eau et constitue un facteur favorable vis-à-vis de la durabilité hydrique. Toutefois, ce paramètre ne permet pas, à lui seul, de conclure à une excellente résistance au gel-dégel. Une telle conclusion nécessite un essai spécifique de résistance au gel-dégel.

Tab. 3: Valeurs de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte.

Éprouvette	mh (gr)	ms (gr)	md (gr)	ρb (kg/m³)	P0 (%)
1	221,84	352,72	352,45	2688	0,21
2	236,31	374,68	374,45	2701	0,17
3	221,08	351,55	351,21	2686	0,26
4	234,88	375,63	373,68	2650	1,39
5	231,27	369,34	368,06	2660	0,93
6	235,4	375,42	373,84	2665	1,13
Moyenne				**2675**	**0.68**
Ecart type				**20**	**0.53**

2. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

2.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre les éprouvettes séchées à 70 °C à une immersion partielle de 3 mm de hauteur d'eau et de les peser après essuyage de la partie immergée à l'aide d'un linge humide à des intervalles de temps donnés. Les échéances sont : 30 min, 60 min, 180 min, 480 min, 1 440 min, 2 880 min et 4 320 min.

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité C (en grammes par mètre carré par la racine carrée du temps en secondes) est représenté par la pente de régression marquant la première phase d'absorption (voir fig.12).

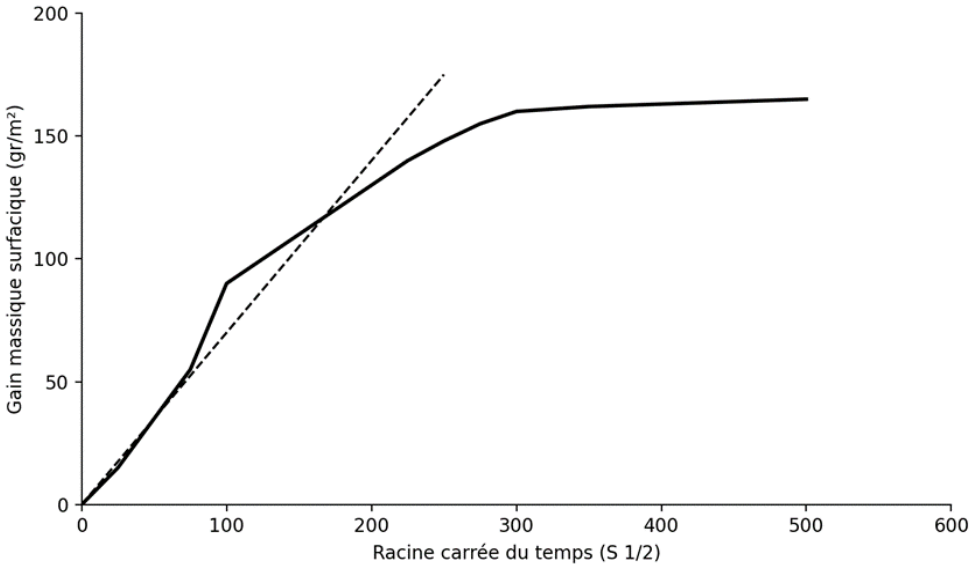


Fig. 12 : Courbe de capillarité.

2.2. Résultats

Les résultats du coefficient d'absorption capillaire sont représentés dans le tableau 04.

Tab. 4 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau par capillaire.

Epouvette	C(g/m²/S⁰·⁵)
1	0.69
2	0.06
3	0.13
4	0.82
5	0.55
6	0.82
Moyenne	0.51
Ecart type	0.31

L'ensemble des essais physiques réalisés selon les normes **NF EN 1925** met en évidence les propriétés remarquables de compacité et d'imperméabilité du matériau testé :

- ***Cinétique de succion limitée (NF EN 1925) :***

L'absorption d'eau par capillarité est particulièrement lente, avec un coefficient moyen. Cette valeur confirme la très faible interconnexion des pores.

- ***Appréciation de la durabilité :***

Le coefficient moyen d'absorption d'eau par capillarité est de 0,51 g/m²/s⁰·⁵, avec un écart-type de 0,31 g/m²/s⁰·⁵. Cette valeur traduit une absorption capillaire limitée dans les conditions de l'essai et constitue un facteur favorable vis-à-vis de la durabilité hydrique. Toutefois, ce paramètre ne permet pas, à lui seul, de conclure à une bonne résistance au gel-dégel.

3. Détermination de l'absorption d'eau à la pression atmosphérique

3.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre les éprouvettes après séchage jusqu'à masse constante à une immersion dans l'eau à pression atmosphérique, puis les peser pendant une durée spécifique. Il est à noter que l'absorption d'eau à pression atmosphérique est exprimée en pourcentage, par le rapport entre la masse de l'éprouvette saturée (obtenue à masse constante) et la masse de l'éprouvette sèche.

A la fin, l'absorption d'eau à pression atmosphérique Ab de chaque éprouvette est calculée par l'équation :

$$Ab = (ms - md) / md \times 100$$

Avec :

- ms : Masse de l'éprouvette saturée (après immersion dans l'eau jusqu'à masse constante), en grammes ;
- md : Masse sèche, en grammes.

3.2. Résultats

Les résultats d'absorption d'eau à pression atmosphérique sont représentés dans le tableau 05.

Tab. 5 : Valeurs d'absorption d'eau à pression atmosphérique Ab.

Eprouvette	md(g)	ms(g)	Ab(%)
1	361.35	361.47	0.03
2	366.62	368.27	0.45
3	348.24	348.86	0.18
4	370.71	370.84	0.04
5	373.84	374.73	0.24
6	371.34	372.00	0.18
Moyenne			**0.19**
Ecart type			**0.15**

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion sous pression atmosphérique, mené conformément à la norme NF EN 13755, révèlent les caractéristiques physiques suivantes :

- Comportement au mouillage Le taux moyen d'absorption d'eau à la pression atmosphérique est de 0,19 %, avec un écart-type de 0,15 %. Cette faible valeur traduit une faible quantité d'eau absorbée dans les conditions de l'essai. Cette valeur, particulièrement basse, atteste d'un réseau poreux très peu accessible à l'eau à pression ambiante.
- Durabilité face aux intempéries : Avec une valeur nettement inférieure à 1%, cette pierre naturelle présente une faible absorption d'eau constitue un facteur favorable à la durabilité hydrique du matériau. Toutefois, elle ne permet pas, à elle seule, de conclure à une excellente résistance au gel-dégel et la cristallisation des sels.
- Domaines d'application recommandés : Ces propriétés hydriques qualifient le matériau pour des utilisations exigeantes en environnement exposé aux intempéries (revêtements de façades, dallages extérieurs, margelles ou éléments de voirie).

4. Vitesse de propagation du son

4.1. Principe de l'essai

Une impulsion de vibrations longitudinales est générée par un transducteur électro-acoustique maintenu en contact avec une surface de la pierre soumise à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans la pierre, l'impulsion de vibrations est convertie en un signal électrique par un deuxième transducteur et des circuits électroniques de chronométrage permettent de mesurer le temps de propagation de l'impulsion.

Toutefois, l'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (75×50×300) mm^3 dans le sens longitudinal.

4.2. Résultats

Les résultats obtenus des vitesses de propagation du son sont regroupés dans le tableau 06.

Tab. 6: Valeurs des vitesses de propagation du son.

Température (°C)	Méthode d'essai	Distance (mm)	Temps de propagation	Vitesse (Km/s)	Vitesse Moyenne (Km/s)
25.4	Transmission Direct	300	53.8	53.8	5.88
			54.5	5.51	
			50.5	6.00	
			49.8	6.06	
			47.3	6.34	
			51.3	5.85	
			Ecart type		0.31

Les mesures de la vitesse de propagation des ultrasons en transmission directe, réalisées conformément à la norme NF EN 14579 à une température de 25°C, apportent les enseignements suivants :

- *Qualité et compacité de la matrice :*

La vitesse moyenne de propagation des ondes ultrasoniques est de 5,88 km/s, avec un écart-type de 0,31 km/s. Ces valeurs indiquent une bonne continuité de la matrice dans les conditions de l'essai. Toutefois, la vitesse ultrasonique ne doit pas être interprétée seule comme une preuve de l'excellente qualité ou de la durabilité globale du matériau

Intégrité structurale :

Les valeurs obtenues (comprises entre 5,51 et 6,34 km/s) excluent la présence de discontinuités majeures, de microfissures traversantes ou d'une altération interne importante.

- *Synthèse globale des propriétés physiques :*

Ces résultats sont en parfaite concordance avec la faible porosité ouverte ($P_0 < 1\%$), la masse volumique élevée ($\rho \approx 2675$ kg/m^3) et le faible coefficient d'absorption capillaire mesurés précédemment, confirmant le caractère très compact et résistant de la pierre.

B. Essai mécanique

1. Essai de compression

1.1. Principe de l'essai

L'essai de compression est réalisé sur des éprouvettes cubiques (70×70×70) mm³ conformément à la norme EN 1926. La résistance à la compression R est donnée par l'équation :

$R = F/A$

Où :

- F : Charge maximale à la rupture exprimée en N ;
- A : Section transversale de l'éprouvette exprimée en mm² ;
- R : Résistance à la compression exprimée en MPa ;
- d1 : Longueur de l'éprouvette en mm ;
- d2 : Largeur de l'éprouvette en mm.

1.2. Résultats

Les essais de compression réalisés sur les six éprouvettes cubiques issues de la carrière d'El Kaada permettent d'évaluer la résistance mécanique de la roche ornementale et d'analyser son comportement sous charge. Les résultats d'essais obtenus sur les éprouvettes prélevées sont regroupés dans le tableau 07.

Tab. 7: Valeur de la résistance en compression de cubes.

Éprouvette	d1 (mm)	d2(mm)	Section (mm2)	Charge (kN)	Résistance R (MPa)
1	70	71	4970	533	107
2	71	71	5041	608	121
3	72	71	5112	611	120
4	69	70	4830	312	65
5	70	70	4900	373	76
6	69	70	4830	322	67
	Moyenne		**4947**	**460**	**93**
			Ecart type	**140**	**26**

- *Résistance mécanique globale*

La résistance moyenne à la compression obtenue pour l'ensemble du lot est de 93 MPa, avec un écart-type de 26 MPa. Cette valeur moyenne témoigne d'une bonne résistance mécanique générale de la roche ornementale d'El Kaada, la classant parmi les roches dures, aptes à l'extraction et aux usages industriels et décoratifs usuels.

- *Dispersion et hétérogénéité des faciès :*

L'examen La résistance moyenne à la compression est de 93 MPa, avec un écart-type de 26 MPa. Les valeurs individuelles varient de 65 à 121 MPa, montrant une dispersion liée à l'hétérogénéité du matériau., notamment aux variations de fissuration, de porosité ou de microstructure. En l'absence d'une correspondance précise entre les éprouvettes et les lithofaciès rougeâtre, grisâtre et noirâtre, il n'est pas possible d'attribuer directement ces variations mécaniques à un lithofaciès particulier.

2. Résistance à la rupture par flexion

2.1. Principe de l'essai

L'essai de la résistance à la rupture par flexion est effectué sur des éprouvettes de dimension (300×50×50) mm³ conformément à la norme **NF EN 12372**. La résistance à la flexion Rtf est exprimée par la relation suivante :

$Rtf = (3 F l) / (2 b h^2)$

Avec :

- Rtf : contrainte de rupture en MPa ;
- F : force de rupture en N ;
- l : longueur entre appui en mm ;
- b : largeur de l'éprouvette en mm ;
- h : épaisseur de l'éprouvette en mm.

2.2. Résultats :

Les essais de flexion sous charge centrée (flexion 3 points), réalisés conformément à la norme **NF EN 12372** sur six éprouvettes prismatiques de la roche ornementale d'El Kaada, permettent d'apprécier la capacité du matériau à résister aux efforts de traction induits par des contraintes de flexion. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tab. 8: Valeurs de la résistance à la flexion

Eprouvette	h (mm)	b(mm)	I(mm)	F(mm)	Rtf (Mpa)
1	50	50	250	4200	12.6
2	50	50	250	6380	19.1
3	50	50	250	7540	22.6
4	50	50	250	4000	12.0
5	50	50	250	5990	18.0
6	50	50	250	5190	15.6
Moyenne				5550	16.65

Ecart type	1356	4.1

- *Résistance mécanique à la flexion*

. La résistance moyenne à la flexion du lot étudié est de 16,65 MPa, avec un écart-type de 4,01 MPa. Les valeurs individuelles montrent une dispersion relativement importante entre les éprouvettes. Cette dispersion souligne l'intérêt de tenir compte de l'hétérogénéité du matériau lors de son utilisation comme pierre ornementale.

- *Dispersion et hétérogénéité lithologique*

À l'instar des essais de compression, les valeurs individuelles de résistance à la flexion mettent en évidence une variation notable au sein des échantillons testés :

- Les éprouvettes 2 et 3 affichent les performances les plus élevées, atteignant respectivement 19,1 MPa **et** 22,6 MPa.
- Les éprouvettes 1 et 4 enregistrent les résistances les plus faibles, autour de 12,0 à 12,6 MPa.

Cette dispersion (traduite par un écart-type de 4,1 MPa) confirme l'hétérogénéité des lithofaciès exploités dans la carrière d'El Kaada. Ces variations du comportement mécanique en flexion soulignent l'importance d'une sélection rigoureuse des bancs rocheux lors de l'extraction industrielle, afin de garantir l'homogénéité des lots de production destinés à la commercialisation.

3. Résistance à l'usure

3.1. Principe de l'essai

L'essai consiste, en utilisant un matériau abrasif, à provoquer, par le biais d'un disque tournant, une usure sur la face de l'éprouvette, et à mesurer la longueur de l'empreinte produite L'essai d'usure par abrasion a été réalisé conformément à la NF EN 14157:2017, selon la méthode A, dite méthode d'usure au disque large. Le résultat est exprimé par la longueur de la rainure d'usure en millimètres, permet d'évaluer la durabilité et la résistance au trafic de la roche ornementale d'El Kaada. Les données obtenues sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tab. 9: Valeurs des empreintes.

Eprouvette	Rainure (mm)
1	24.6
2	26.4
3	25.6
Moyenne	25.5
Ecart type	0.9

3.2. Résultats :

Les résultats sont exprimés par la longueur de la rainure d'usure (en millimètres) mesurée sur les éprouvettes.

- *Comportement à l'abrasion*

La longueur moyenne de la rainure d'usure obtenue sur le lot d'échantillons est de 25,5 mm, avec un très faible écart-type de 0,9 mm.

- *Homogénéité et résistance au trafic*
  - La longueur moyenne de la rainure d'usure est de 25,5 mm, avec un écart-type de 0,9 mm. La faible dispersion des trois mesures indique une bonne répétabilité dans les conditions de l'essai. L'aptitude du matériau à une application donnée doit toutefois être appréciée en fonction des exigences applicables au produit et à l'usage envisagé La valeur obtenue (25,5 mm) se situe dans les standards usuels pour les roches carbonatées utilisées en tant que roches ornementales, indiquant une aptitude satisfaisante pour des usages en revêtement de sols intérieurs ou d'aménagements soumis à une circulation modérée.

4. Détermination de la résistance aux chocs thermiques

4.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre les éprouvettes à plusieurs cycles de chauffage et de refroidissement afin d'évaluer leur résistance aux variations thermiques perte de résistance

A l'issue des cycles, le cas échéant, on mesure la perte de résistance potentielle conformément à l'EN 12372 et les modifications des propriétés physiques et mécaniques, des essais non destructifs ; la vitesse de propagation du son (v_0) selon l'EN 14579, réalisée sur les éprouvettes avant et après les cycles thermiques.

Les cycles de choc thermique permettent d'évaluer le comportement du matériau face aux variations brusques de température. Les résultats obtenus doivent être interprétés à partir de l'évolution des propriétés physiques et mécaniques avant et après les cycles. Cet essai ne permet toutefois pas, à lui seul, de conclure à la résistance au gel-dégel, qui nécessite une caractérisation spécifique selon la NF EN 14066.

4.2. Résistance à la rupture par flexion

La résistance à la rupture par flexion est effectuée sur des éprouvettes de dimension (300×50×50) mm³. Elle est exprimée par la relation suivante :

$Rtf = (3\ F\ l) / (2\ b\ h^2)$

Avec :

- Rtf : contrainte de rupture en MPa ;
- b : largeur de l'éprouvette en mm ;
- F : force de rupture en N ;
- h : épaisseur de l'éprouvette en mm ;
- l : longueur entre appui en mm.

Les résultats de l'évolution de la résistance à la flexion après cycles thermiques sont résumés dans le tableau 10.

Eprouvette	h (mm)	b (mm)	I(mm)	F(N)	Rtf(Mpa)
1	50	50	250	2490	7.5
2	50	50	250	3060	9.2
3	50	50	250	2970	8.9
4	50	50	250	2990	9.0
5	50	50	250	3540	10.6
6	50	50	250	2190	6.6
Moyenne				2873	8.63
Ecart type				473	1.40

Tab. 10: Valeurs des résistances a la flexion après cycles thermiques

Les résultats montrent une diminution importante de la résistance à la flexion après les cycles thermiques, passant de 16,65 MPa à 8,63 MPa

5. Vitesse de propagation du son :

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (75×50×300) mm³ dans le sens longitudinal. Les résultats du calcul de la variation de la vitesse de propagation du son sont regroupés dans le tableau 11 et 12

Tab. 11: Valeurs des vitesses de propagation du son avant cycles thermiques

Température (°C)	Méthode d'essai	Distance (mm)	Temps de propagation	Vitesse (Km/s)	Vitesse Moyenne (Km/s)
25.4	Transmission Direct	300	53.8	53.8	5.88
			54.5	5.51	
			50.5	6.00	
			49.8	6.02	
			47.3	6.34	
			51.3	5.85	
			Ecart type		0.31

Tab. 12: Valeurs des vitesses de propagation du son après cycles thermiques.

Température (°C)	Méthode d'essai	Distance (mm)	Temps de Propagation	Vitesse (km/s)	Vitesse Moyenne(km/s)
24.5	Transmission direct	300	54.5	5.50	5.76
			54.8	5.47	
			51.5	5.83	
			50.8	5.91	
			49.4	6.07	
			51.8	5.79	
			Ecart type		**0.23**

A l'issu des cycles thermiques, des petites fissures et écaillages sont apparues surtoutsur les angles des éprouvettes prismatiques.

Par ailleurs, la variation de la vitesse de propagation du son calculée à 0,1% près est déterminée suivant la formule :

$\Delta v = [(v0 - vf) / v0] \times 100$

Avec :

- v0 : Vitesse de propagation du son avant l'essai, en km/s
- vf : Vitesse de propagation du son après l'essai, en km/s
- Δv : Variation de la vitesse de propagation du son de l'éprouvette d'essai, en %

Les résultats la variation de la vitesse de propagation du son obtenus sont regroupés dans le tableau 13.

Tab. 13: variation de la vitesse ultrasonique

Eprouvette	Vitessev0 (Km/s)	Vitesse vf (Km/s)	Δv
1	5.58	5.50	1.4
2	5.51	5.47	0.7
3	6.00	5.83	2.8
4	6.02	5.91	1.8
5	6.34	6.07	4.3
6	5.85	5.79	1.0
Moyenne	5.88	5.76	2.0

- D'après les résultats illustrés dans le (Tab. 13), on constate une faible variation (Perte de ~2 %)**.** La baisse de la vitesse de propagation du son entre l'état initial et l'état après les cycles de choc thermique est infime (environ 2 %).
- Concernant le seuil de tolérance ; en géotechnique et dans les normes d'évaluation de la durabilité des pierres, une diminution de la vitesse du son inférieure à 5 % à 10 % indique qu'il n'y a pas eu de microfissuration interne majeure ni de rupture du réseau cristallin de la roche.

Les cycles de choc thermique entraînent une diminution de la résistance moyenne à la flexion, qui passe de 16,65 MPa avant les cycles à 8,63 MPa après les cycles, soit une perte globale d'environ 48,1 %. Parallèlement, la vitesse moyenne de propagation du son diminue de 5,88 à 5,76 km/s, correspondant à une variation d'environ 2,0 %. Les observations visuelles montrent également l'apparition de petites fissures et d'écaillages, notamment au niveau des angles des éprouvettes. Ainsi, la faible variation de la vitesse ultrasonique ne doit pas être considérée isolément. L'évolution des propriétés mécaniques et les observations visuelles montrent une modification significative du comportement du matériau après les cycles thermiques.

6. Résistance à la flexion :

Le pourcentage de variation de la résistance à la flexion (ΔF) est calculé comme suit :

$\Delta F = (Ff - Fr) / Fr \times 100$

Avec :Fr : Résistance à la résistance avant cycles en MPa. Ff : Résistance à la flexion résistance après cycles, en MPa ; ΔF : Variation de la résistance perte de résistance en %

La variation globale a été calculée à partir des résistances moyennes avant et après les cycles thermiques. Les résultats de la variation de la résistance à la flexion obtenus sont donnés dans le tableau 14.

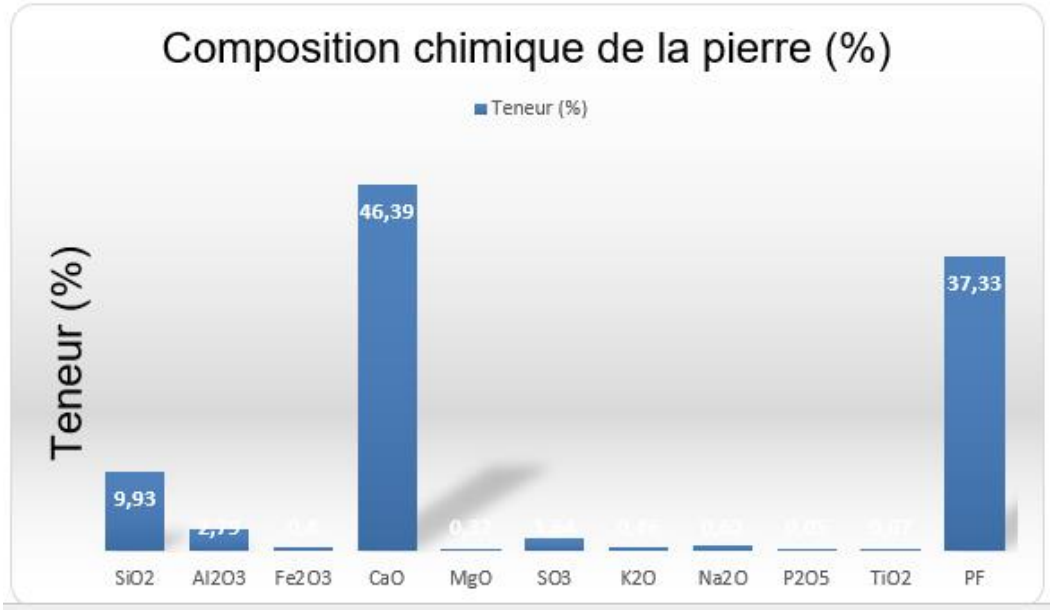
Tab. 14: Résistance à la flexion avant et après les cycles thermiques et variation correspondante.

Eprouvette	Flexion avant (Mpa)	Flexion après (Mpa)	Perte%
1	12.6	7.5	40.5
2	19.1	9.2	51.8
3	22.6	8.9	60.6
4	12.0	9.0	25.0
5	18.0	10.6	41.1
6	15.6	6.6	57.7
Moyenne	16.65	8.63	48.1

III. ETUDE GEOCHIMIQUE

L'analyse par fluorescence X met en évidence une teneur élevée en CaO (46,39 %), accompagnée d'une perte au feu de 37,33 %. Les teneurs en SiO_2 (9,93 %) et Al_2O_3 (2,79 %) indiquent également la présence d'une fraction silicatée ou aluminosilicatée. L'ensemble de ces résultats traduit une composition fortement calcique et carbonatée. Toutefois, la fluorescence X ne permet pas, à elle seule, d'identifier avec certitude les phases minéralogiques présentes. La dominance de la calcite devrait donc être confirmée par une analyse complémentaire par diffraction des rayons X (DRX).La roche est donc un calcaire légèrement argileux ou marno-calcaire, mais à tendance très carbonatée (Tab. 15).

Tab. 15: Résultats d'analyse chimique.



Eléments	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	PF
Teneur (%)	9.93	2.79	0.40	46.39	0.32	1.64	0.46	0.62	0.05	0.07	37.33

Fig. 13 : Représentation des éléments chimiques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La caractérisation lithologique, physico-mécanique et géochimique de la roche ornementale exploitée dans la carrière d'El Kaada a permis de mettre en évidence une variabilité des faciès carbonatés au sein du gisement.

Du point de vue lithologique, trois lithofaciès ont été individualisés : un marbre à nuance rougeâtre, un marbre à nuance grisâtre et un marbre à nuance noirâtre. Ces lithofaciès se distinguent notamment par leur couleur, leur degré de fracturation, la présence de veinules et de géodes de calcite.

À l'état initial, les essais physiques montrent une masse volumique apparente moyenne de 2675 kg/m³, une porosité ouverte moyenne de 0,68 % et une absorption d'eau à la pression atmosphérique de 0,19 %. Ces résultats indiquent une faible accessibilité de l'eau et une bonne compacité du matériau dans les conditions des essais.

Les essais mécaniques donnent une résistance moyenne à la compression de 93 MPa et une résistance moyenne à la flexion de 16,65 MPa. La dispersion des résultats mécaniques met toutefois en évidence une certaine hétérogénéité du matériau. En l'absence d'une correspondance précise entre les éprouvettes testées et les différents lithofaciès, il convient de rester prudent quant à l'attribution de cette dispersion à un lithofaciès particulier.

Après les cycles de choc thermique, la vitesse moyenne de propagation du son diminue de 5,88 à 5,76 km/s, soit une variation d'environ 2,0 %. En revanche, La résistance moyenne à la flexion est de 16,65 MPa avant les cycles thermiques. Après les cycles thermiques, elle diminue à 8,63 MPa, traduisant une perte globale d'environ 48,1 %.. Ces résultats montrent que l'évaluation du comportement du matériau après choc thermique doit prendre en compte simultanément les mesures ultrasoniques, les observations visuelles et surtout l'évolution des propriétés mécaniques.

Les faibles valeurs de porosité et d'absorption d'eau constituent des facteurs favorables à la durabilité hydrique. Toutefois, elles ne permettent pas, à elles seules, de conclure à une excellente résistance au gel-dégel. Une telle évaluation nécessiterait un essai spécifique de gel-dégel.

Enfin, l'analyse par fluorescence X met en évidence une composition fortement calcique et carbonatée, avec une teneur en CaO de 46,39 % et une perte au feu de 37,33 %. La fluorescence X ne permettant pas d'identifier directement les phases minéralogiques, la présence dominante de calcite devra être confirmée par une analyse minéralogique complémentaire telle que la DRX.

L'ensemble des résultats contribue ainsi à une meilleure connaissance des caractéristiques de la roche ornementale d'El Kaada et peut servir de base à une valorisation plus adaptée du matériau en fonction de ses propriétés et des exigences des applications envisagées.Ainsi, les résultats ultrasoniques ne doivent pas être interprétés isolément. L'évaluation du comportement du matériau face au vieillissement thermique doit prendre en compte simultanément les observations visuelles, les variations de vitesse ultrasonique et surtout l'évolution des propriétés mécaniques.

Enfin, les faibles valeurs de porosité et d'absorption d'eau constituent des facteurs favorables à la durabilité hydrique, mais elles ne permettent pas de conclure directement à une résistance au gel-dégel. Une telle caractérisation nécessiterait un essai spécifique de gel-dégel conformément à la NF EN 12371.

- Usages possibles en tant que pierre ornementale

Sur la base des essais physico-mécaniques réalisés (résistance en compression moyenne d'environ 93 MPa, résistance à la flexion, résistance à l'usure, tenue au choc thermique, porosité et absorption d'eau), ce type de marbre est généralement destiné à :

1. **Revêtement décoratif** : dallage, habillage de façades et de murs intérieurs/extérieurs (bâtiments, halls, sols)
2. **Éléments architecturaux et de construction** : plans de travail, escaliers, plinthes, colonnes, encadrements

3. **Marbrerie funéraire et monumentale** : pierres tombales, monuments, statuaire (usage classique pour un marbre présentant des variations chromatiques comme celui-ci)
4. **Objets d'art et de décoration** : sculptures, objets décoratifs, plateaux, socles, en exploitant l'aspect esthétique (patine, veinules de calcite, aspect « bréchique »)

5. **Granulats/agrégats** (usage secondaire) si la qualité pétrographique ne permet pas l'usage ornemental sur certaines zones du gisement — d'où l'intérêt justement de l'étude, qui vise à distinguer les faciès de bonne qualité ornementale de ceux impropres à cet usage

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ameur, M. (1988). Étude spatio-temporelle des dépôts du début du Jurassique dans l'extrême pointe NW de l'Algérie : les Monts des Traras (Thèse de doctorat d'État). Université Claude Bernard - Lyon 1, France.

Ameur, M. (1999). Contribution à l'étude géologique et structurale des Monts des Traras (Algérie nord-occidentale) (Dossier de soutenance d'habilitation universitaire / Synthèse des travaux). Département des Sciences de la Terre, Université d'Oran Es-Sénia, Algérie.

Ameur, M. (1999). Histoire d'une plate-forme carbonatée de la marge sud-téthysienne : l'environnement liasique des Monts des Traras (Algérie nord-occidentale). Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, n° 150, 263 p.

Benest, M. (1982). Importance des décrochements sénestres (N-S) et dextres (E-W) dans les Monts de Tlemcen et de Daïa (Algérie occidentale). Revue de Géologie dynamique et de Géographie physique, vol. 23, fasc. 5, pp. 345–362.

Benest, M. (1985). Évolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-Est marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire. Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon, n° 95 (fasc. 1 et 2), 581 p.

Benest, M., Bensalah, M., Bouabdellah, H., & Ouardas, T. (1999). La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine tlemcénien (Avant-pays tellien d'Algérie occidentale) : stratigraphie, paléoenvironnements, dynamique sédimentaire et tectogenèse alpine. Bulletin du Service Géologique de l'Algérie, vol. 10, n° 2, pp. 127–157.

Doumergue, F. (1910). Carte géologique détaillée de l'Algérie au 1/50 000, feuille Terni, n° 300. Service de la Carte Géologique de l'Algérie, Alger.

Entreprise Nationale des Granulats [ENG]. (2022). Etude géologique actualisé / Données d'exploitation (Document technique inédit). ENG, Alger.

Google Earth Pro. (2026). Image satellitaire de la carrière d'El Kaada et des Monts des Traras. Récupéré sur le Site Web de Google Earth.

Guardia, P. (1975). Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord-occidentale : relations structurales et paléogéographiques entre le Rif externe, le Tell et l'avant-pays atlasique (Thèse de doctorat de spécialité / ès Sciences). Université de Nice, France, 289 p.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Position géographique des Monts de Traras (Google Earth, 2026) 9

Fig. 2 : Colonne lithostratigraphique synthétique des Monts de Tlemcen 12

Fig. 3 : Schéma structurale de bassin des Monts de Tlemcen (d'aprés Benest, 1982) 13

Fig. 4 : Carte géologique des Monts de Traras (d'après Guardia, 1975). 15

Fig. 5 : Schéma structural des Monts des Traras d'après Guardia, 1975, modifié par Ameur, 1999). 16

Fig. 6: Image satellitaire montrant le positionnement de la carrière 17

Fig. 7 : Colonne lithologique du gradin inférieur. 19

Fig. 8: Colonne lithologique du gradin supérieur. 20

Fig. 9: Surface polie montrant lithofaciès à nuance rougeâtre 20

Fig. 10: Surface polie montrant lithofaciès à nuance grisâtre 21

Fig. 11: Surface polie montrant lithofaciès à nuance noirâtre 21

Fig. 12 : Courbe de capillarité. 25

Fig. 13 : Représentation des éléments chimiques. 40

LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1 : Coordonnées UTM du périmètre carré de la carrière d'El Kaada..... 18

Tab. 2 : Les normes appliquées pour les Essais physico-mécanique 22

Tab. 3: Valeurs de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte. 24

Tab. 4 : Valeurs du coefficient d'absorption d'eau par capillaire. 26

Tab. 5 : Valeurs d'absorption d'eau à pression atmosphérique Ab. 27

Tab. 6: Valeurs des vitesses de propagation du son. 29

Tab. 7: Valeur de la résistance en compression de cubes. 31

Tab. 8: Valeurs de la résistance à la flexion 32

Tab. 9: Valeurs des empreintes. 34

Tab. 10: Valeurs des résistances a la flexion après cycles thermiques 36

Tab. 11: Valeurs des vitesses de propagation du son avant cycles thermiques 36

Tab. 12: Valeurs des vitesses de propagation du son& après cycles thermiques. 37

Tab. 13: Valeurs de la variation de la vitesse de propagation du son. 38

Tab. 14: Variation de la résistance à la flexion. 39

Tab. 15: Résultats d'analyse chimique. 40

MÉMOIRE DE MASTER

Type de Master : Professionnel
Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : Géo-Ressources

Titre du mémoire : ÉTUDE QUALITATIVE D'UN GISEMENT D'UNE ROCHE ORNEMENTALE : EXEMPLE DU GISEMENT DE HONAÏNE

Autrice : BENABBOU Ilhem

Résumé
Cette étude porte sur la caractérisation de la roche ornementale exploitée dans la carrière d'El Kaada, située à Honaïne, dans les Monts des Traras, wilaya de Tlemcen. L'objectif est d'étudier ses caractéristiques géologiques, lithologiques, physico-mécaniques et géochimiques afin d'évaluer son potentiel de valorisation.

Les observations de terrain ont permis d'identifier trois lithofaciès : un faciès à nuance rougeâtre, un faciès grisâtre et un faciès noirâtre. Ils se distinguent notamment par leur couleur, leur fracturation et la présence de calcite.

Les essais physico-mécaniques indiquent une masse volumique apparente moyenne de 2 675 kg/m³ et une porosité ouverte moyenne de 0,68 %. L'absorption d'eau est faible. La résistance moyenne à la compression est de 93 MPa et celle à la flexion de 16,65 MPa. Après les cycles thermiques, une diminution de la résistance à la flexion est observée.

L'analyse géochimique confirme la nature fortement carbonatée de la roche, principalement liée à la calcite. Les résultats mettent en évidence un intérêt potentiel pour son utilisation comme pierre ornementale, sous réserve de tenir compte de la variabilité du matériau.

Mots clés : El Kaada, Honaïne, Monts des Traras, lithofaciès, marbre, pierre ornementale, propriétés physico-mécaniques, choc thermique, analyse géochimique, calcite.

Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen | Département des Sciences de la Terre et de l'Univers | N° d'ordre : 03/DSTU/2026