



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N°d'enregistrement

/ / / / /

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الري والهندسة المدنية

Département Hydraulique et Génie Civile

## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: ST

Filière: Génie Civile

Spécialité: Structures

Thème :

**Le comportement mécanique de la pierre dans les constructions patrimoniales**

**Étude de cas " Le rempart défensif du Ksar El-Guerrara "**

Déposé le :20 /06/2023

Par :

- *Ben Abdallah Hacem*
- *Hamdi Hennay Lamine*

Évalué Par le jury composé de :

Nessil Hamid	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Président
Matallah Zineb	M.A.A	Univ. Ghardaïa	Examinateur
Cady Mokhtaria	M.C.A	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

Sommaire .....	I
Remerciements .....	VI
شكرو اهداء .....	VII
Résumé .....	VIII
Abstract .....	IX
ملخص .....	X
Liste des figures .....	XI
Liste des tableaux .....	XIV
Liste des abréviations explicitées .....	XV
Introduction générale.....	1
<b>PARTIE A. ETUDE THEORIQUE.....</b>	<b>4</b>
<b>CHAPITER I : Etat de l'ART.....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>5</b>
I.1. Définir les concepts de recherche.....	5
I.2. Les thèses de doctorats.....	6
I.3. Les livre .....	8
Conclusion.....	9
<b>CHAPITER II : Matériaux et techniques de construction en pierre .....</b>	<b>11</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>12</b>
II.1. Matériaux de construction en pierre.....	12
II.1.1. La pierre.....	12
II.1.1.1. Propriétés et utilisation des roches .....	13
A. Roches magmatiques .....	13
A.1.Le granit.....	13
A.2.Le porphyre .....	13
A.3.Le basalte .....	13
B. Roches sédimentaires .....	14
B.1. Le calcaire .....	14
B.2.Le schiste .....	14
B.3.Le grès .....	15
C. Roches métamorphiques .....	15
C.1.Le marbre.....	15

## SOMMAIRE

---

C.2. Le quartzite .....	15
II 1.2. Les liants minéraux.....	16
II.1.2.1. Liants minéraux aériens.....	16
II.1.2.2. Liants hydraulique.....	16
II.1.3. La chaux.....	16
II.1.3.1. La chaux aérienne .....	16
II.1.3.2. La chaux hydraulique .....	17
II.1.3.3. Mode de préparation traditionnel du mortier de chaux .....	18
II.1.4. L'Argile.....	18
II.2. Techniques de construction en pierre .....	19
II.2.1. Mur de pierre a une seule rangée .....	19
II.2.2. Mur de pierre a deux rangées .....	19
II.2.3. Emboitage des pierres .....	20
II.2.4. Plafond traditionnel.....	20
II.2.5. Les parois des puits .....	20
II.2.6. Les piliers en pierre.....	21
II.2.7. Les fondations.....	22
II.2.8. Pavage des seguias (ruelles canal) .....	22
II.2.9. Plafonds de blocs de pierre) .....	23
II.3. Types d'utilisations de la pierre .....	23
II.3.1. Industrie de divers matériaux de construction.....	23
II.3.2. Toiture en pierres .....	23
II.3.3. Construction en pierre sèches.....	24
II.3.4. Pavage en pierre.....	25
II.3.5. Décoration des façades.....	25
<b>Conclusion</b> .....	26
<b>CHAPITER III : L'impact de la haute température sur la pierre de construction</b>	27
<b>Introduction</b> .....	28
III.1. Influence de la minéralogie sur le comportement à hautes températures des pierres .....	28
A. Transformations physico-chimiques .....	28
A.1. Le calcaire.....	28
A.2. Le quartz.....	28

## SOMMAIRE

---

B. Changements de couleur associés .....	29
B.1. Le grès.....	29
B.2. Le calcaire.....	30
C. Dilatation thermique .....	30
C.1. Le calcaire.....	31
C.2. Le quartz.....	31
C.3. Autres rochers.....	32
III.2. Evolution des propriétés des pierres sous l'effet de hautes températures .....	32
A. Propriétés microstructurales .....	32
A.1 Porosité totale .....	32
A.2. fissuration et endommagement thermique.....	33
B. Propriétés mécaniques .....	35
B.1. Résistance en compression.....	35
B.2. Résistance en traction .....	36
C. Propriétés de transfert .....	38
C.1. Thermique $\lambda$ .....	38
C.2. Hydrique (perméabilité à l'eau) .....	39
<b>Conclusion</b> .....	40
<b>CHAPITER VI: l'impact du phénomène de gel-dégel sur la pierre de construction</b> .....	41
<b>Introduction</b> .....	42
VI.1. Evolution des propriétés des pierres après des cycles de gel-dégel .....	42
A. Endommagement à l'échelle macroscopique et microscopique .....	42
B. Propriétés mécaniques .....	43
C. Propriétés physiques .....	44
D. Propriétés microstructurales .....	45
VI.2. l'impact du phénomène de gel-dégel sur la pierre de construction.....	45
<b>Conclusion</b> .....	47
<hr/> <b>PARTIE B.    ETUDE PRATIQUE</b> .....	48
<hr/> <b>CHAPITER V : Méthode et protocole expérimentaux</b> .....	49
<b>Introduction</b> .....	49
V.1. Présentation de site d'étude" Ksar El-Guerrara" .....	49
V.1.1. Localisation géographique du Ksar El-Guerrara.....	49

## SOMMAIRE

---

V.1.2. Localisation administrative du Ksar El-Guerrara.....	50
V.1.3. Description du Ksar El-Guerrara .....	50
V.1.4. Histoire du Ksar El-Guerrara .....	50
V.1.5. Bâtiments du Ksar El-Guerrara .....	51
V.2. Présentation de cas d'étude " Les tours et le rempart défensif du Ksar El-Guerrara" .....	51
V.2.1. Histoire des tours et des remparts du Ksar El-Guerrara.....	51
V.2.2. Description Les tours et le rempart défensif du Ksar El-Guerrara.....	52
V.2.3. L'importance des tours et le rempart défensif.....	52
V.2.4. Technique de construction de ces remparts.....	52
V.3. Critères de prélèvement des échantillons .....	54
V.3.1:But et principe de l'échantillonnage .....	54
V.3.2. Prélèvement sur le mur ancien (pierre) .....	54
V.3.3. Echantillonnage en laboratoire.....	54
V.4. Méthodes de caractérisation expérimentale .....	55
V.4.1. Analyse chimique de l'échantillon par des techniques d'observation minutieuses .....	55
V.4.2 Porosité totale accessible à l'eau $N_T$ .....	56
V.4.3. Résistance en compression $R_c$ .....	57
V.4.4. Résistance en traction $R_T$ .....	58
V.4.5. Vitesse des ondes ultrasonores $V_p$ et module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ ...	59
V.4.6. Mesure de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval .....	61
V.4.7. Mesure de La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles .....	62
V.4.8.Mesure Les propriétés mécaniques de la pierre à hautes températures.....	64
V.4.9. Détermination de La résistance au gel .....	65
<b>Conclusion</b> .....	67
<b>Chapitre VI : Les propriétés mécaniques de la pierre</b> .....	68
<b>Introduction</b> .....	69
VI.1. Les ordres de grandeurs des principales caractéristiques .....	69
VI.2. Les propriétés physiques et mécaniques de la pierre à l'état sain .....	70
VI.2.1. Analyse chimique de l'échantillon .....	70
VI.2.2. Porosité totale $N_T$ et la masse volumique $\rho$ .....	70

## SOMMAIRE

---

VI.2.3. Résistance en compression $R_c$ .....	71
VI.2.4. Résistance en traction $R_T$ .....	71
VI.2.5. Vitesse des ondes ultrasonores $V_p$ et module d'élasticité dynamique $E_{dyn}$ ...	72
VI.2.6. Mesure de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval .....	73
VI.2.7. Mesure de La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles .....	74
VI.3. Les propriétés mécaniques de la pierre à hautes températures .....	75
VI.3.1. Résultats de La résistance à la compression $R_c$ .....	75
VI.3.2. Perte de masse .....	76
VI.4. Les propriétés mécaniques de la pierre au gel-dégel.....	77
VI.4.1. Résultats de La résistance à la compression $R_c$ .....	77
VI.4.2. Surveiller le changement d'état pendant les cycles de gel-dégel .....	78
<b>Conclusion</b> .....	80
<b>Conclusion : Résultats et discussions</b> .....	81
<b>Conclusion Générale</b> .....	83
<b>Perspectives de recherche</b> .....	85
<b>Références Bibliographiques</b> .....	87

## REMERCIEMENTS

---

Tout d'abord, nous voudrions remercier notre Seigneur qui

Il a donné la force d'accomplir ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant

**Dr.CADY MOKHTARIA** pour nous avoir guidés à travers cette

travail, et sur ses annotations, et notes sages

Vos conseils nous ont été précieux pour y parvenir

un travail.

Un merci tout particulier aux ingénieurs du Laboratoire Sud des Travaux Publics (LTPS) de La wilaya de Ghardaïa, qui nous ont soutenus et mis à notre disposition toutes les informations et moyens disponibles.

Merci également à l'expert **AHMED NOUH**, propriétaire du projet Ksar Tafilalet. Et **Dr.ABOUBAKEUR SALAH** pour leur accueil chaleureux et les précieuses informations qu'ils nous ont données à ce sujet.

Nos derniers remerciements et ce ne sont pas les moindres, vont à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

# شكر وإهداء

﴿ الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله ﴾

اللهم لك الحمد كما ينبغي لجلال وجهك وعظيم سلطانك ، الحمد لله

الذي لا يبلغ مدحه القائلون ولا يؤدي حقه المجتهدون.

أما الشكر الأول لله رب العالمين الذي أخرجنا من العدم ، أفاض علينا

وافر النعم.

ونتوجه بجزيل الشكر إلى أبائنا و أمهاتنا الأكرمين على دعائهم

وتشجيعهم المتواصل على طلب العلم.

وكما نتوجه بالشكر الجزيل إلى كل ما قدم لنا من توجيهات

ومعلومات قيمة من أساتذة وزملاء وباحثين وأهل ساهمت في

إطراء موضوع دراستنا.

## **RESUME**

---

En raison de la nature du climat dans la région du El Guerrara, qui se caractérise par un grand changement de température entre un minimum et un maximum, une chaleur élevée en été et un hiver froid, les habitants de la région ont été contraints d'utiliser des pierres. En tant que matériau de construction du patrimoine urbain, il répond aux exigences de durabilité, de dureté et de tenue à long terme.

À l'heure actuelle, la durabilité et la continuité des installations du bâtiment sont considérées comme l'une des caractéristiques requises les plus importantes, car des études sont en cours à leur sujet pour y parvenir. Notre objectif est peut-être de connaître les secrets de la solidité et de la durabilité de ces bâtiments.

Dans notre recherche, nous nous sommes occupés de l'étude du comportement mécanique de la pierre dans la construction traditionnelle, et elle est encadrée par des ingénieurs spécialisés formés dans ce domaine. À travers lequel les principes de préservation de nombreux édifices patrimoniaux.

Nous mettrons également l'accent sur l'importance de notre étude à Ksar El-Guerrara (le rempart défensif du Ksar comme étude de cas), en menant des essais expérimentaux en laboratoire sur un échantillon extrait du rempart, en utilisant des technologies modernes pour assurer la qualité du matériau en pierre dans la conception et la construction pour résister aux divers chocs et contraintes mécaniques résultant de charges lourdes. Pour conserver ses dimensions d'origine, ainsi que pour étudier la qualité des dommages résultant de facteurs climatiques tels que la chaleur, l'humidité et le phénomène de gel et de dégel, et de les comparer avec des études antérieures, et de trouver des solutions ou de les développer, de compter sur eux dans les futures opérations de construction afin de préserver le patrimoine culturel matériel et de valoriser la culture locale, d'une manière qui contribue à la revitalisation du tourisme pour la ville.

**Mots clés :** pierre, températures, gel et de dégel, patrimoine bâti, comportement mécanique.

## **ABSTRACT**

---

Due to the nature of the climate in the region of El Guerrara, which is characterized by a large change in temperature between a minimum and a maximum, high heat in summer and cold winter, the inhabitants of the region have been forced to use stones. As an urban heritage building material, it meets the requirements of durability, hardness and long-term strength.

At present, the durability and continuity of the building's facilities are considered one of the most important required characteristics, since studies are being carried out on them to achieve this. Perhaps our goal is to find out the secrets of the strength and durability of these buildings.

In our research, we have taken care of the study of the mechanical behavior of stone in traditional construction, and it is framed by specialized engineers trained in this field. Through which the principles of preservation of many heritage buildings.

We will also emphasize the importance of our study in Ksar El-Guerrara (the defensive rampart of Ksar as a case study), by conducting experimental laboratory tests on a sample extracted from the rampart, using modern technologies to ensure the quality of the stone material in the design and construction to withstand various shocks and mechanical stresses resulting from heavy loads. To maintain its original dimensions, as well as to study the quality of damage resulting from climatic factors such as heat, humidity and the phenomenon of freezing and thawing, and to compare them with previous studies, and to find solutions or to develop them, to rely on them in future construction operations in order to preserve the material cultural heritage and enhance the local culture, in a way that contributes to the revitalization of tourism for the city.

**Keywords:** stone, temperatures, freezing and thawing, built heritage, mechanical behavior.

نظرا لطبيعة المناخ في منطقة القرارة والذي يتميز بتغيير كبير لدرجات الحرارة بين الحد الأدنى والحد الأقصى وارتفاع الحرارة في فصل الصيف والبرودة في فصل الشتاء، فقد أجبر سكان المنطقة على استعمال الحجارة كمواد بناء في التراث المبني لتناسبها مع متطلبات المتانة والصلابة والسلوك طويل المدى.

وفي وقتنا الحالي تعد استدامة المنشآت البنائية ومتانتها أهم خاصية مطلوبة إذ تجرى عليها دراسات لتحقيق ذلك ولعل هدفنا معرفة أسرار صمود واستدامة هذه المباني.

تناولنا في ورقتنا البحثية دراسة السلوك الميكانيكي للحجر في البناء التراثي، ويشرف عليه مهندسون مختصون وتمكنون في هذا المجال، تتمثل أهميتها في مجال الصيانة والترميم، بما في ذلك دراسة مادة الحجر الأثرية السليمة وكذلك دراسته تحت العوامل المؤثرة (درجات الحرارة، دورات التجميد والذوبان)، من خلالها مبادئ الحفاظ على العديد من المباني التراثية .

سنركز أيضاً على أهمية دراستنا في قصر القرارة ( السور الدفاعي للقصر كحالة دراسة) ، بإجراء اختبارات تجريبية في المخبر على عينة مستخرجة من السور، وذلك باستخدام التقنيات الحديثة لضمان جودة المادة الحجرية في التصميم والبناء لتحمل مختلف الصدمات والضغوط الميكانيكية الناتجة عن الأحمال الثقيلة وللحفاظ على أبعادها الأصلية ، وكذلك دراسة نوعية الأضرار الناتجة عن العوامل المناخية مثل الحرارة والرطوبة و ظاهرة التجمد والذوبان و مقارنتها مع الدراسات السابقة وإيجاد حلول لها أو تطويرها ، للاعتماد عليها في عمليات البناء المستقبلية من أجل الحفاظ على التراث الثقافي المادي و تعزيز الثقافة المحلية ، من أجل المساهمة في تنشيط الحركة السياحية للمدينة.

**الكلمات المفتاحية:** الحجر، درجات الحرارة، التجميد والذوبان، البناء التراثي، السلوك الميكانيكي.

## **LISTE DES FIGURES**

---

Figure 1 : le cycle des roches.....	12
Figure 2 : granit rouge .....	13
Figure 3 : porphyre.....	13
Figure 4 : Le basalte.....	13
Figure 5 : le calcaire.....	14
Figure 6: Pierres bleues (calcaire) .....	14
Figure 7 : Le schiste.....	14
Figure 8 : Le grès.....	15
Figure 9 : Le marbre .....	15
Figure 10 : Le quartzite .....	15
Figure 11: Cycle de la chaux.....	17
Figure 12: Étapes de préparation du mortier de chaux.....	18
Figure 13 : Mur en pierre à une seule rangée.....	19
Figure 14 : Mur en pierre à double rangée.....	19
Figure 15 : Emboitage des pierres.....	20
Figure 16: Plafond traditionnel.....	20
Figure 17 : pierres d'attache à l'intérieur du puits.....	21
Figure 18: piliers en pierre de forme rectangulaire.....	21
Figure 19: Les fondations.....	22
Figure 20: allées du canal.....	22
Figure 21: Plafonds d'arcs et de voutains en pierre.....	23
Figure 22 : Toiture en pierres .....	24
Figure 23 : mur de soutènement .....	24
Figure 24 : Pavage des routes en pierre .....	25
Figure 25 : Décoration routes en pierre .....	25

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 26 : Diagramme de phase de la silice.....	29
Figure 27 : Expansion et présence de fissures sur les spécimens de grès de Rorschach quelques jours après les années 900°C.....	30
Figure 28 : Changements de couleur d'échantillons soumis à différents traitements thermiques.....	30
Figure 29 : Déformation thermique linéaire des principaux minéraux.....	31
Figure 30 : Evolution de la porosité totale de diverses pierres après traitements thermiques jusqu'à 900 °C .....	32
Figure 31 : Evolution des microfissures inter et intra-granulaires dans un granite soumis à différents traitements thermiques jusqu'à 850 °C.....	34
Figure 32 : Courbes contrainte-déformation en compression simple à chaud à différentes températures: (a) Pierre calcaire d'Euville; (b) Grès des Vosges; (c) Marbre de Carrare.....	35
Figure 33: Evolution de la résistance en traction de (a) pierres calcaires et (b) marbres en fonction de la température.....	37
Figure 34 : L'effet de la température sur le taux d'absorption d'eau: a) calcaires, b) marbres..	39
Figure 35 : Durabilité au gel-dégel de quatre pierres diverses.....	42
Figure 36 : Evolution de l'état visuel d'endommagement d'un grès Vosgien après gel-dégel	43
Figure 37 : (a) Evolution de la perte de masse; (b) Evolution de la vitesse des ondes P; (c) Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction du nombre de cycles de gel-dégel,	45
Figure 38 : Schéma du bloc façonné.....	46
Figure 39 : Courbe de charge/décharge de l'entaille du 1er cycle de gel/dégel à la rupture...	46
Figure 40 : Eprouvette de Larrys perlé après rupture.....	47
Figure 41 : Localisation géographique de Guerrara .....	49
Figure 42 : barrage d'Al-Fosaea .....	50
Figure 43 : Rempart défensif du Ksar El-Guerrara.....	51

## LISTE DES FIGURES

---

Figure 44 : Le quatrième rempart .....	52
Figure 45 : Rempart défensif se composant d'un seul bloc de pierres .....	53
Figure 46 : Rempart défensif se composant de deux faces en pierres remplies par un amas de sable.....	53
Figure 47: Préparation des échantillons .....	55
Figure 48 : essais de la masse volumique absolue .....	56
Figure 49 : (a) Essai de résistance en compression ; (b) Facies de rupture caractéristique d'un échantillon de calcaire .....	57
Figure 50 : Essai de résistance en traction par fendage: dispositif expérimental développement de la fissuration sous chargement .....	58
Figure 51 : Dispositif expérimental de la mesure de la vitesse des ondes P pour la détermination du module d'élasticité dynamique .....	60
Figure 52 : Essai La résistance à l'usure par essai Micro-Deval.....	62
Figure 53 : Essai La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles .....	64
Figure 54 : Le four utilisé est 55 °C, l'échantillon est à l'intérieur du four.....	65
Figure 55 : La chambre froide utilisée est à - 10°C, les échantillons sont à l'intérieur de la chambre froide .....	66
Figure 56 : Obtention de chaux après une température de 900°C degrés .....	76
Figure 57 : Fragmentation et perte de masse à 900°C .....	77
Figure 58 : (a) L'échantillon est dans un milieu aqueux à l'intérieur du refroidisseur, (b) Evolution de l'état visuel d'endommagement des échantillons après 30 cycles de gel-dégel..	79
Figure 59 : Évaluer l'effet de différentes températures sur la résistance à la compression du calcaire.....	80

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

Tableau (1) : Conductivité thermique des principaux minéraux.....	38
Tableau (2) : Répartition par niveaux de l'évolution relative des résistances en compression selon la porosité totale des pierres à l'état sain.....	44
Tableau (3) : La charge des billes selon la classe de granules.....	62
Tableau (4) : Valeurs clés pour les tests de taille les plus courants pour le calcaire.....	69
Tableau (5) : Classification des pierres naturelles selon la résistance à la compression (Rc) .....	69
Tableau (6) : Résultats analyse chimique.....	70
Tableau (7) : Les valeurs de porosité totale NT et la masse volumique apparente $\rho$ .....	70
Tableau (8) : Valeurs moyennes de la résistance en compression des pierres saines.....	71
Tableau (9) : Valeurs moyennes de la résistance en traction des pierres saines	72
Tableau (10) : Valeurs de vitesse d'onde P et module d'élasticité dynamique des pierres saines.....	72
Tableau (11) : Classification de la pierre d'après la vitesse du son.....	72
Tableau (12) : Valeurs de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval des pierres saines.....	73
Tableau (13) : Indice de qualité global en MICRO-DEVAL.....	73
Tableau (14) : Valeurs de La résistance à l'usure par essai Los Angeles des pierres saines.....	74
Tableau (15) : La valeur de la résistance à la compression des pierres à une température de 55°C.....	75
Tableau (15) : La valeur de la perte de masse à différentes températures.....	76
Tableau (17) : La valeur de résultats de La résistance à la compression après gel.....	77

## LISTE DES ABREVIATIONS EXPLICITEES

---

<b>C°</b>	Degrés Celsius ;
<b>K</b>	Kelvin (Unité de température)
<b>E</b>	module d'élasticité en Pa ;
<b><math>\nu</math></b>	Coefficient de Poisson ;
<b>MPA</b>	Méga Pascal ;
<b><math>\Delta\alpha</math></b>	Différentiel de coefficient de dilatation thermique linéaire en °C <sup>-1</sup>
<b><math>\Delta T</math></b>	Intensité du gradient thermique en °C ;
<b><math>\tau</math></b>	Densité surfacique d'énergie ;
<b>C<sub>D</sub></b>	Coefficient de dispersion ;
<b>N<sub>T</sub></b>	Porosité totale accessible à l'eau N <sub>T</sub> ;
<b>V<sub>p</sub></b>	Vitesse des ondes ultrasonores en m.s <sup>-1</sup> ;
<b>E<sub>dyn</sub></b>	Module d'élasticité dynamique en Gpa ;
<b>T</b>	le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en $\mu$ s ;
<b>m saturée</b>	masse de l'échantillon saturé surface sèche, en g ;
<b>m sèche</b>	masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve, en g ;
<b>m hydrostatique</b>	masse hydrostatique en g ;
<b><math>\rho</math></b>	masse volumique réelle en kg/m <sup>3</sup> ;
<b><math>\rho_{\text{eau}}</math></b>	masse volumique de l'eau (= 1000 kg/m <sup>3</sup> ) ;
<b>R<sub>c</sub></b>	Résistance en compression R <sub>c</sub> ;
<b>R<sub>T</sub></b>	Résistance en traction ;
<b>L<sub>A</sub></b>	Coefficient Micro Deval (%) ;
<b>L<sub>ch</sub></b>	Coefficient Los Angeles (%) ;
<b>F</b>	Valeur de la force de compression appliquée à la rupture, en N ;
<b>L:</b>	Longueur de l'éprouvette en mm ;
<b><math>\emptyset</math></b>	Diamètre de l'éprouvette en mm ;
<b>LCPC</b>	Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées ;
<b>LTPS</b>	Laboratoire Des Travaux Publics Du Sud ;
<b>CTMNC</b>	Centre Technique De Matériaux Naturels De Construction ;
<b>OPVM</b>	Office de Protection et de Promotion de la Vallée du M'ZAB ;
<b>ASTM</b>	Anciennement American Society For Testing And Materials ;
<b>AFNOR</b>	Association Française De Normalisation ;
<b>EN</b>	Normes Européennes ;
<b>NF</b>	Norme Française.

### **Le contexte :**

La pierre s'inscrit dans la représentation et de traduction d'usages depuis des siècles, l'étude du comportement mécanique des structures et d'analyse du matériau est pertinemment importante dans le projet de conservation et de restauration du bâti patrimonial.

Afin de comprendre ce comportement mécanique, notre recherche s'est concentrée sur les propriétés mécaniques les plus importantes de la pierre de construction dans les structures patrimoniales, en utilisant le rempart défensif du Ksar El-Guerrara comme cas d'étude. Nous avons examiné ces propriétés à la fois dans l'état sain de la pierre et en tenant compte des effets des variations de température et du phénomène de gel et de dégel.

### **La problématique :**

La problématique de la préservation du patrimoine bâti est un défi culturel et scientifique. Sous l'action de conditions environnementales agressives, les matériaux de construction subissent une modification de leur microstructure et de leurs propriétés physiques. Il peut s'en suivre une altération de leur comportement mécanique en déformation et en rupture. Les pierres, qui sont les principaux matériaux de construction employés dans les monuments anciens sont des matériaux naturels complexes, constitués d'un ou plusieurs types de minéraux assemblés de façon plus ou moins compacte, laissant un réseau poreux plus ou moins connecté. Parmi les sollicitations sévères, on peut citer celles faisant intervenir de hautes températures. En effet, l'incendie s'inscrit depuis longtemps comme l'un des risques majeurs de détérioration des monuments historiques. Les principaux mécanismes à l'origine des dégradations sont connus mais il n'y a cependant pas consensus sur l'importance relative de chaque mécanisme sur le comportement mécanique des pierres soumises à un incendie. Par ailleurs, les phénomènes de détérioration des monuments en pierre par cycles de gel-dégel constituent un autre exemple des problématiques que peuvent engendrer des expositions à des conditions environnementales sévères. Ces différentes sollicitations thermo-hydro-mécaniques à basse et haute température mettent en jeu des phénomènes de changement de phases, des problématiques de déformations thermiques différentielles et de transferts hydriques.

### **Les objectifs :**

Les objectifs de cette étude consistent en deux sujets différents mais également complémentaires. La première partie de ce travail porte sur l'étude du comportement à haute température des pierres de construction utilisées dans les bâtiments patrimoniaux. En ce sens, la campagne expérimentale devrait permettre de déterminer les propriétés mécaniques de ces matériaux lorsqu'ils sont exposés à différents niveaux de températures élevées. La deuxième partie s'est entendue sur les dommages résultant du gel et du dégel des pierres de construction.

- Évaluer le caractère mécanique de la pierre, notamment sa résistance à la compression et sa résistance à la traction.
- Réaliser des constructions durables.
- Trouver les propriétés mécaniques de la pierre à hautes températures.
- Étudier les propriétés mécaniques de la pierre au gel-dégel.

### **Plan d'étude :**

Cette étude se compose de deux parties (A, B), la première partie (A) comprend la possibilité de présenter le sujet en mettant les dernières conclusions des études précédentes jusqu'à présent et les objectifs. La partie (B) consiste à décrire les approches expérimentales et les protocoles utilisés au cours de cette étude. De plus, les résultats de la caractérisation des caractéristiques de la pierre étudiée dans l'état de santé sont présentés, et les résultats obtenus en ce qui concerne l'endommagement des pierres de construction sous l'influence des températures élevées et des cycles de gel et de dégel sont discutés.

**Chapitre I :** Un état de l'art.

**Chapitre II :** Citant les techniques utilisées dans la construction avec la pierre tout en mentionnant en parallèle les matériaux de construction d'accompagnement qui sont d'une importance égale à ce matériau principal.

**Chapitre III :** l'endommagement des maçonneries exposées à des températures élevées.

**Chapitre IV :** l'effet du gel et du dégel sur la pierre de construction

**Chapitre V** : Ce chapitre présente la méthode expérimentale adoptée pour la réalisation des travaux de recherche au sein des Laboratoires Des Travaux Publics Du Sud (LTPS). Avec une description du cas d'étude et des protocoles suivis lors de la conduite des essais.

**Chapitre VI** : Les résultats de l'étude de la pierre à bâtir dans son état sain et exposée à des températures élevées et à des cycles de gel et de dégel ont été discutés. Les propriétés pétrographiques, microstructurales et mécaniques sont révélées, suivies d'une analyse statistique avancée.

### **Conclusion : Résultats et discussions**

#### **Conclusion générale**

#### **Perspectives de recherche**

# PARTIE A : ETUDE THEORIQUE

## CHAPITER I

### Etat de l'ART

**Introduction :**

Dans ce chapitre, nous effectuons un examen approfondi et complet des connaissances antérieures sur le comportement mécanique de la pierre dans les bâtiments patrimoniaux, y compris l'analyse des études antérieures, des recherches scientifiques et des techniques d'observation appliquées dans ce chapitre.

Ces études permettent de comprendre en profondeur les mécanismes de comportement de la pierre, tels que la résistance à la compression, la résistance à la traction, la dureté face aux agressions environnementales, etc. Il vise également à explorer les différentes techniques de diagnostic utilisées pour évaluer l'état des matériaux, détecter les fissures et les déformations et évaluer la stabilité structurelle des bâtiments.

Notre travail consiste à actualiser et valoriser les résultats de ces études dans le domaine de la préservation du patrimoine architectural en pierre. Cela comprend l'utilisation de matériaux de restauration compatibles, de techniques de renforcement structurel, de méthodes de conservation préventive et d'approches durables pour assurer la longévité des bâtiments patrimoniaux.

**I.1. Définir les concepts de recherche :**

Parmi les termes les plus importants qui incluent les concepts de l'étude sont les suivants:

. **La propriété mécanique** : est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques. Par exemple, la résistance à la compression, la résistance aux chocs, la dureté,

. **La masse volumique apparente** : elle reflète le degré de compacité du matériau et permet d'évaluer la masse pour un volume donné.

**La masse volumique absolue** : est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

. **La porosité ouverte** : elle est déterminée par la proportion de vides (pores) dans la pierre, reliés entre eux et donc accessibles à l'eau.

. **La résistance à la flexion** : elle permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en flexion pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés (caractéristique indispensable pour le dimensionnement des revêtements en pierre attachée et des revêtements de sols notamment).

- . **La résistance à la compression** : elle permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible compression pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés (caractéristique indispensable pour les applications structurelles).
- . **La résistance thermique** : est la capacité du matériau à résister aux variations de chaleur, c'est-à-dire au chaud comme au froid. Elle est indiquée en W/ m.K (watt par mètre. Kelvins).
- . **La résistance au gel** : lors de cet essai, on soumet des éprouvettes à des cycles gel-dégel directs, et on vérifie visuellement et au moyen d'une mesure du module d'élasticité si le matériau est résistant au gel.
- . **La résistance à l'usure** : c'est un critère pour déterminer si un matériau est approprié comme revêtement de sol dans un espace déterminé.
- . **Le glissement** : elles déterminent une caractéristique essentielle de sécurité pour l'utilisation de la pierre en revêtement de sol, la glissance, exprimée en unité de glissement.
- . **L'absorption d'eau par capillarité** : détermine la quantité d'eau que la pierre sèche peut absorber, par unité de temps et de surface.
- . **La dureté** : est une qualité physique indiquant la résistance au toucher, à la pression, au choc et à l'usure.
- . **Les constructions patrimoniales** : est l'ensemble des constructions humaines qui ont une grande valeur parce qu'elles caractérisent une époque, une civilisation ou un événement et que, à cause de cette valeur, nous voulons transmettre aux générations futures.
- . **La construction durable** : est la création, la restauration, la rénovation ou la réhabilitation d'un bâtiment en lui permettant de respecter au mieux l'écologie à chaque étape de la construction.

## **I.2. Les thèses de doctorats :**

### **A. Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti : étude du comportement hydromécanique [2015]**

**Par Dr Charlotte Walbert**

Le but de cette étude est de caractériser les propriétés physiques et mécaniques du calcaire avant déformation et de mettre en relation l'évolution de ces propriétés lors de la fracturation sous l'influence des cycles de gel et de dégel. Cinq calcaires ont été sélectionnés pour cette étude, et à cet effet la caractérisation multi-échelle des cinq calcaires, à l'état brut, malgré une

composition minérale similaire, montre une grande diversité de microstructures et de propriétés mécaniques.

Les résultats les plus importants obtenus à partir de cette étude sont :

- Ces cinq calcaires présentent une large gamme de porosité totale allant de 10,7% à 35,4% et des porosités en 48 heures allant de 4,4% à 28,2%.
- Les tests mécaniques donnent un module d'élasticité stable entre 13,7 et 50,8 GPa.
- La résistance à la compression de ces calcaires varie de 9,7 à 67,5 MPA.
- Le facteur de traction utilisé pour évaluer la résistance de la pierre à l'initiation et à la propagation des fissures varie de 0,11 à 0,59 MPA.
- La résistance de la pierre aux sollicitations des cycles de gel-dégel dépend autant de ses performances mécaniques initiales que de sa porosité.
- La croissance de la glace et la migration de l'eau vers le front de glace augmentent la pression de l'eau non gelée dans les pores provoquant une expansion et par conséquent des dommages matériels.
- La résistance à la compression présente des variations très aléatoires selon les types de pierre et semble être un indicateur non significatif pour décrire les dommages causés par les cycles de gel-dégel.
- Le coefficient de saturation est l'un des facteurs les plus importants pour la sensibilité au gel de la pierre.

### **B. Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones [2014]**

Par [Dr Ahmet Ozguven](#), [Dr Yilmaz Ozelik](#)

L'objectif des auteurs de cette étude est d'étudier l'évolution des propriétés physico-mécaniques des matériaux de construction naturels dont le calcaire et le marbre exposés à différentes températures. L'étude a été reçue le 26 décembre 2013. Reçu tel que révisé le 25 juin 2014. Accepté le 7 octobre 2014. Disponible en ligne le 29 octobre 2014.

Les résultats les plus importants obtenus à partir de cette étude sont :

- La résistance des pierres naturelles est affectée par les changements de température.
- Les calcaires conservent une partie de leur résistance jusqu'à 400 °C.
- Le calcaire s'est transformé en chaux après que la température ait atteint 400°C.

- Les valeurs de résistance à la compression chutent rapidement.
- L'augmentation relative se produit dans le marbre jusqu'à 200 ° C, tandis que la résistance diminue avec l'augmentation de la température.
- Aux pierres naturelles exposées à la température, la résistance à la traction a diminué avec l'augmentation de la température.
- Le comportement du calcaire après 600 °C a tendance à baisser en résistance à la traction.
- Les endroits où les pierres naturelles sont utilisées ont acquis une grande importance en raison de la réduction de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température.
- Les pierres de construction doivent être utilisées compte tenu des problèmes de sécurité dans les endroits susceptibles d'atteindre des températures élevées.
- Toutes les pierres naturelles ont la même tendance de propriétés d'usure lors de l'analyse de la résistance à l'usure.
- Les valeurs de dureté diminuent pour toutes les pierres naturelles exposées à la température.
- L'érosion de la pierre a considérablement augmenté à des températures plus élevées.
- Aucune perte par congélation n'a été observée jusqu'à 600 °C dans tous les échantillons.
- Après le test de gel-dégel, différents taux de perte de masse se produisent.
- Les valeurs de résistance à la compression des échantillons après l'expérience de gel-dégel et des échantillons sains sont presque identiques.

### **I.3. Les livre :**

#### **A. Conservation of Historic Buildings [2017]**

**Par Dr Salman Ahmed AlMahari**

Cette recherche vise à couvrir plusieurs axes scientifiques qui contribuent à la préservation du patrimoine architectural, et ces axes ou objectifs sont les suivants :

- Diagnostic des matériaux de construction utilisés dans les bâtiments patrimoniaux, qu'il s'agisse de pierre ou d'autres matériaux, à l'aide de méthodes et d'appareils scientifiques modernes.
- Découvrez les techniques de construction utilisées par le passé dans la construction d'édifices patrimoniaux.
- Étudier et diagnostiquer les facteurs et les manifestations de dégradation des matériaux de construction utilisés dans les bâtiments patrimoniaux.

- Suggérer des méthodes et des matériaux scientifiques appropriés pouvant être utilisés pour résoudre les problèmes auxquels ces bâtiments sont exposés.

Les résultats les plus importants obtenus à partir de cette étude sont :

- L'un des rôles les plus dangereux que les températures peuvent jouer dans le processus de destruction des anciens matériaux de construction est leur changement continu entre les températures élevées et basses, et il a été prouvé que la différence de température entre le jour et la nuit est l'un des facteurs naturels les plus importants.
  - Lorsque les couches externes des pierres sont exposées à des températures élevées, elles ont tendance à se dilater davantage que les couches internes, ce qui les fait se désintégrer.
  - Les changements thermiques entraînent également des processus de dilatation et de contraction à des températures très basses appelées mouvements thermiques, et ce phénomène peut provoquer des dommages courants tels que l'apparition de fissures dans le bâtiment.

### **Conclusion :**

Le calcaire a des propriétés microstructurales hétérogènes. Le comportement mécanique des pierres est étroitement lié à leur microstructure multi phase. La porosité, l'arrangement granulaire (compacité des éléments) et la présence de microfissures affectent la réponse de la pierre lors du chargement et la porosité semble jouer un rôle important dans la résistance des pierres. Ces propriétés micro- et mécaniques déterminent la durabilité des pierres. Les variations au sein des pierres, causées par des conditions environnementales agressives, génèrent des contraintes mécaniques provoquant des changements macroscopiques tels que des fissures. Les cycles de gel-dégel sont connus pour endommager les pierres, mais les mécanismes de dégradation ne sont pas définitivement acceptés. Les cycles de gel-dégel génèrent de la fatigue dans le matériau avec la formation de contraintes dues à l'expansion du volume de glace, les propriétés intrinsèques de la pierre affectent le taux de dommages causés par les cycles de gel-dégel et la formation de fissures. Le plus souvent, des caractéristiques microscopiques, telles que la porosité totale ou la taille des pores, sont avancées pour expliquer la sensibilité de la pierre au gel. Cependant, elles ne peuvent à elles seules expliquer la complexité de ces phénomènes. Il est nécessaire d'augmenter le nombre de paramètres d'étude pour mieux comprendre les mécanismes de changement. De plus, une étude à différentes

échelles peut mettre en évidence l'importance de certains paramètres. La granulométrie, la morphologie des pores, la présence de défauts de structure d'un point de vue microscopique, les performances mécaniques et la dureté d'un point de vue macroscopique peuvent être autant de facteurs à prendre en compte.



**CHAPTER II :**  
**Matériaux et techniques de construction en pierre**

**Introduction :**

Avant de procéder à citer les techniques suivies dans la construire en pierre, il y'a lieu d'évoquer en parallèle les matériaux de construction d'accompagnement qui sont d'une importance égale à cette matière principale.

Parmi ces matériaux connus à utilisation fréquente, on peut citer à titre d'exemple la chaux et le plâtre, qui sont des matériaux issus eux-mêmes de la transformation de la roche par l'utilisation des fours

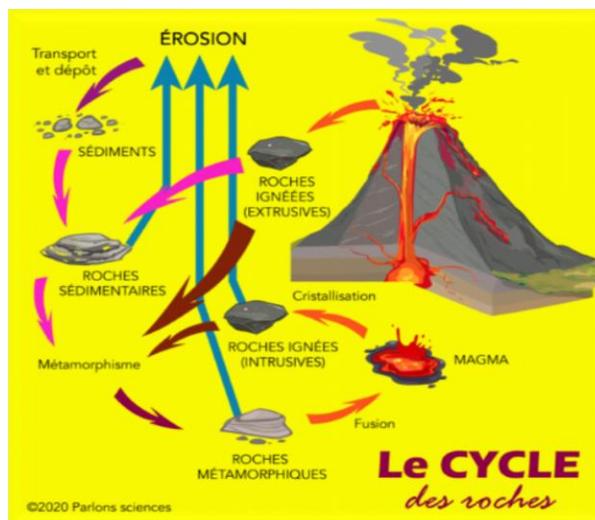
**II.1. Matériaux de construction en pierre :**

**II.1.1. La pierre :**

La pierre est l'un des matériaux les plus anciens utilisés par l'homme dans la construction. L'abondance des dépôts rocheux, leur durabilité et leur résistance en ont fait l'un des matériaux les plus utilisés. Sa capacité à supporter de lourdes charges en fait un matériau idéal pour la réalisation de gros travaux.

Les roches sont géologiquement divisées en trois types :

- **Les roches magmatiques** : sont formées par le refroidissement et la solidification du magma comme le granite, le porphyre, le basalte, etc.
- **Les roches sédimentaires** : sont formées par dépôt et solidification de sédiments organiques ou minéraux comme le calcaire, Le schiste, le grès, etc.
- **Les roches métamorphiques** : sont des roches provenant de masses de roches préexistantes transformées par l'action de la température et de la pression comme le marbre, le quartzite, etc.



**Figure 1 : le cycle des roches**

**II.1.1.1. Propriétés et utilisation des roches :**

**A. Roches magmatiques :**

**A.1.Le granit :**

➤ Caractéristiques :

- Grande résistance à la compression.
- Très lourd (poids spécifique entre 2,64 et 3,05 kg/dm<sup>3</sup>).
- Très bonne résistance aux agents atmosphériques.
- Se laisse difficilement travailler.



**Figure 2 : granit rouge <sup>(1)</sup>**

➤ Utilisation :

Généralement utilisé pour les parements de façades, les escaliers et les perrons.

**A.2.Le porphyre :**

➤ Caractéristiques :

- Compact et dur avec des petits et grands cristaux dispersés.
- Résiste à l'usure et aux agents atmosphériques
- Difficile à travailler.
- Plus lourd que le granit.
- Couleur généralement grisâtre



**Figure 3 : porphyre <sup>(1)</sup>**

➤ Utilisation :

Convient très bien comme pierraille pour béton et aussi comme pierre à paver.

**A.3.Le basalte :**

➤ Caractéristiques :

- Très dur et très compact.
- Résistant aux agents atmosphériques.
- De couleur variante de gris sombre au bleu-noir.
- Très difficile à travailler.- Poids spécifique de 2,88 à 3 kg/dm<sup>3</sup>.



**Figure 4 : Le basalte <sup>(1)</sup>**

➤ Utilisation:

Pratiquement pas utilisé dans la construction à cause de sa grande dureté ; convient pour des travaux hydraulique (murs de quai, brise-lames). Cependant, le basalte de lave est moins dur, scié en plaques et utilisé pour les marches d'escalier.

**B. Roches sédimentaires :**

**B.1. Le calcaire :**

Principalement constitué de carbonate de calcium et partagé en deux sortes principales :

- Pierres blanches.
- Pierres bleues.

**B.1.1. Pierres blanches :**

➤ Caractéristiques :

- Calcaire très sableux (de 15 à 40% de sable).
- Bonne résistance à la compression
- Altération rapide de la couleur.
- Résistance assez faible aux agents atmosphériques.
- Absorption d'eau de 2 à 30% en poids.

➤ Utilisation :

Moellons et parements.

**B.1.2. Pierres bleues :**

➤ Caractéristiques:

- Résistance à la compression allant de 1200 à 1700 kg/cm<sup>2</sup>.
- Absorption d'eau de 0,3 à 1,5%.
- Résistance à l'usure (devient lisse à l'usure).
- Section de rupture lisse avec des cristaux brillants.
- Peut être facilement travaillé.

➤ Utilisation:

Pour les travaux de façade, soubassements, plinthes, seuils de portes et de fenêtres, encadrements et appuis de fenêtre.



**Figure 5 : le calcaire <sup>(1)</sup>**



**Figure 6 : Pierres bleues (calcaire) <sup>(1)</sup>**

**B.2. Le schiste :**

➤ Caractéristiques:

- Très dur et compact.
- Doux au toucher.
- Résistant aux agents atmosphériques.
- A structure stratifiée.

➤ Utilisation: Moellons bruts de construction, les déchets de schiste servent à la fabrication de briques et de blocs de construction.



**Figure 7 : Le schiste <sup>(1)</sup>**

**B.3.Le grès :**

➤ Caractéristiques:

- Absorption d'eau : de 4 à 5 % en poids.
- Résistant aux agents atmosphériques.
- Résistance moyenne à la compression

➤ Utilisation:

Maçonnerie extérieure, pavage.



**Figure 8 : Le grès <sup>(1)</sup>**

**C. Roches métamorphiques :**

**C.1.Le marbre :**

➤ Caractéristiques:

- Peut-être poli
- Dureté et résistante aux agents atmosphériques.
- Changement de couleur peut se produire sous l'influence de l'atmosphère et de lumière.

➤ Utilisation:

Principalement pour les travaux d'intérieur tels les parements d'escalier et de sol, appuis de fenêtre, lambris, ...



**Figure 9 : Le marbre <sup>(1)</sup>**

**C.2. Le quartzite :**

➤ Caractéristiques:

- Très dur.
- Surface rugueuse et résistante à l'usure.
- Stable aux influences atmosphériques.
- Couleur variante du gris au bleu clair.

➤ Utilisation:

Beaucoup utilisé pour des sols et des escaliers, aussi pour parements de façade sous forme de dalle ou de bandes.



**Figure 10 : Le quartzite <sup>(1)</sup>**

### **II.1.2. Les liants minéraux :**

Les liants aériens sont des corps transformés en particules extrêmement fines pour être mélangés à l'eau donnant lieu à une pâte collante qui se solidifie progressivement puis se pétrifie et s'adhère à la pierre de construction pour former ainsi un corps homogène solide et résistant.

Après son malaxage à l'eau, le sable et le gravier le liant aérien nous donne un béton ou un mortier. Il demeure bien connu que les liants aériens ne se solidifient qu'en présence de l'air uniquement, alors qu'il existe d'autres liants qui se solidifient dans les milieux humides ou dans l'eau. Cette particularité nous amène à classifier les liants comme suit:

#### **II.1.2.1. Liants minéraux aériens :**

Les liants aériens ne se solidifient pas, et ne conservent leurs caractéristiques mécaniques qu'en présence de l'air, à savoir : la chaux aérienne, le plâtre.

#### **II.1.2.2. Liants hydraulique :**

Les liants hydrauliques se solidifient et conservent leurs caractéristiques mécaniques en présence de l'eau et l'air également, à savoir la chaux hydraulique, le ciment.

### **II.1.3. La chaux :**

On peut dire que le mot chaux exprime un groupe de substances unies par une propriété importante, à savoir qu'il s'agit de substances résultant de la combustion (Calcination), c'est-à-dire que leurs propriétés physiques et chimiques sont fondamentalement affectées par l'exposition de la pierre source, qui est du calcaire à une chaleur très élevée. <sup>(2)</sup>

Il existe deux types de chaux :

#### **II.1.3.1. La chaux aérienne :**

De point de vue utilisation, La chaux aérienne est considérée depuis des centaines d'années, comme étant l'un des premiers matériaux de construction au même titre que le plâtre. Les traces et les vestiges découverts à travers l'histoire démontrent que les chinois, les pharaons et les peuples maya ont construit des édifices en utilisant la chaux comme matière principale, ces édifices ont survécu des siècles. La chaux fut utilisée également de façon très étendue durant le moyen âge. Celle-ci était souvent mélangée avec de la terre glaise, elle continua en tant que matière principale de construction jusqu'au dix-neuvième siècle. Elle est très répandue dans plusieurs régions d'Algérie où existaient des fours destinés à la fabrication de la chaux comme le témoignent les restes et traces existants à ce jour.

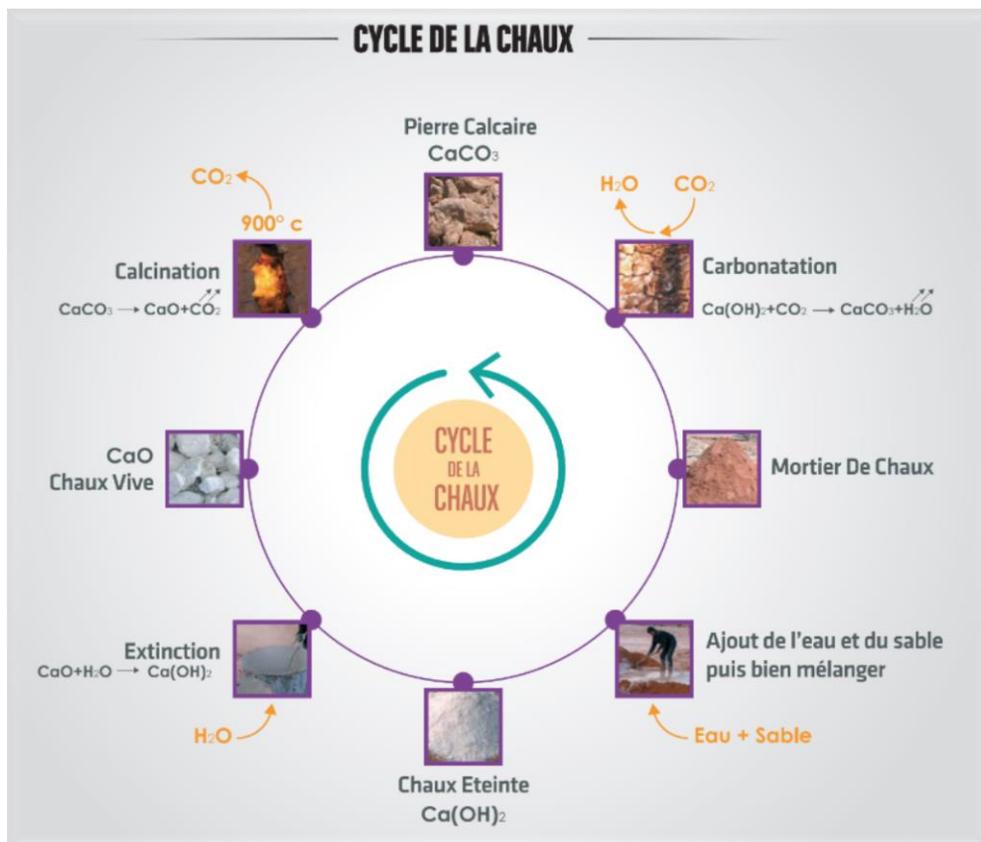
La chaux se forme à la suite de la calcination et de la combustion des pierres calcaires à la formule chimique:CaCO<sub>3</sub> ou des pierres de dolomite, c'est-à-dire formée de CaCO<sub>3</sub> et MgCO<sub>3</sub> par le biais de leur exposition aux feux de forte chaleur avant son extinction à l'aide de son arrosage à l'eau. Après son utilisation comme liant, celui-ci se solidifie progressivement au contact de l'air d'où il tire son appellation «Chaux aérienne ».

Ce liant contient un taux inférieur à 8 % de matière argileuse dans sa composition. La chaux aérienne est connue également pour être une chaux grasse si le taux d'argile dedans est inférieur à 5 %, c'est-à-dire qu'il résulte de la combustion de pierres calcaires propres. Il est dit également que la chaux est faible (terne) si le taux d'argile dedans est compris entre 5% et 12 %.

**II.1.3.2. La chaux hydraulique :**

La chaux hydraulique naturelle se constitue d'un mélange de particules de marne et d'argile riche à la silice et l'alumine et le fer, avec une proportion comprise entre 8% et 20%.

On dit qu'une chaux hydraulique est faible si la proportion des matières argileuse dedans est égale à 8%, par contre si cette proportion atteint les 20% on considère que la chaux est une chaux hydraulique forte.

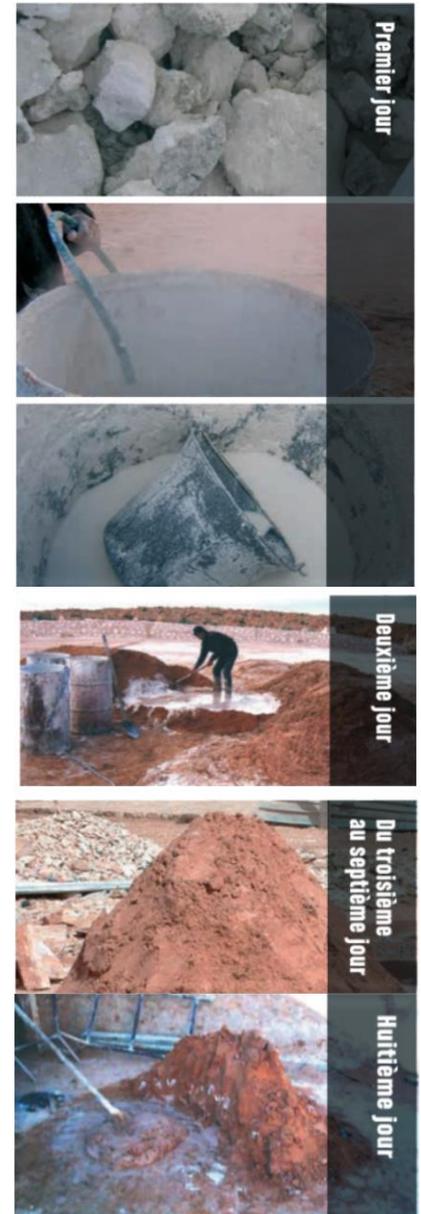


**Figure 11 : Cycle de la chaux <sup>(2)</sup>**

**II.1.3.3. Mode de préparation traditionnel du mortier de chaux :**

Pour préparer le mortier de chaux de manière adéquate il y'a lieu de suivre la méthode de préparation suivante qui dure huit jours étape par étape:

- **Le premier jour:** faire tremper dans l'eau, la chaux vive issue de la calcination, s'en suit une grande ébullition par le fait de la réaction entraînant l'extinction de la chaux vive, Laisser refroidir jusqu'à l'extinction totale de la chaux.
- **Le deuxième jour:** il faut ajouter au mélange une quantité d'eau suffisante pour obtenir un lait de chaux de bonne qualité(hydroxyde de calcium),ensuite passer au tamis pour pouvoir éliminer les déchets et les particules indésirables. Pour préparer un mortier de chaux (pâte de chaux) de bonne qualité, il y'a lieu de choisir le sable approprié auquel il faut ajouter une quantité suffisante de lait de chaux éteint puis bien mélanger pour obtenir une pâte compacte et homogène.
- **Du troisième au septième jour:** laisser la pâte séjourner en réaction lente.
- **Le septième jour:** préparer une quantité de chaux éteinte en suivant la même méthode du premier jour.
- **Le huitième jour :** ajouter une quantité appropriée de la chaux éteinte à la pâte préparée à l'avance (du troisième au septième jour), mélangé de façon à obtenir enfin une pâte homogène de mortier de chaux lequel peut être utilisé ensuite dans les différentes opérations de construction.



**Figure 12: Étapes de préparation du mortier de chaux<sup>(2)</sup>**

**II.1.4. L'Argile :** Substance constituée d'un mélange minéral de particules métalliques de différentes tailles et contenant naturellement de l'eau et de l'air .L'ajout de ces deux composants ou la réduction de l'un ou des deux dans l'argile nous donne un matériau pour la construction.

**II.2. Techniques de construction en pierre :**

Pendant des milliers d'années, la pierre a représenté la civilisation. Avec sa dureté et sa résistance, la pierre a donné une image idéale et claire de ce que devrait être l'architecture, avec toutes ses fonctions. Parmi les techniques les plus importantes utilisées dans la construction :

**II.2.1. Mur de pierre a une seule rangée :**

Cette technique est adoptée généralement pour les murs de séparation ou les murs de clôture. Les pierres sont soigneusement choisies en faisant orienter la face plate vers la façade principale, l'incohérence de l'autre façade est traitée à l'aide du mortier de crépissage. Aux points de contacts et de rencontre des murs, on procède à l'emboitage des pierres pour réaliser la liaison donc le renforcement de la solidité et la réalisation de l'équilibre. <sup>(2)</sup>



**Figure 13 : Mur en pierre à une seule rangée** <sup>(2)</sup>

**II.2.2. Mur de pierre a deux rangées :**

Cette technique de construction est adoptée en grande partie dans la construction des mosquées, des maisons des tours...etc. la partie plate de la pierre se pose vers la façade apparente (découverte) du mur, la partie non homogène par contre est orientée vers l'intérieur. Les pierres sont attachées les unes aux autres à l'aide du mortier de chaux, les creux vides sont souvent comblés par des cailloux. <sup>(2)</sup>



**Figure 14 : mur en pierre a doublé** <sup>(2)</sup>

**II.2.3. Emboitage des pierres :**

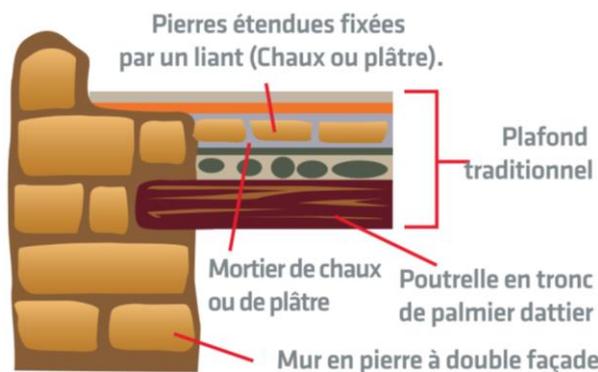
L'emboîtement des pierres les unes aux autres se fait au niveau de l'angle du mur pour donner lieu à un entremêlement des deux parties du mur et former ainsi de la structure, un seul corps soudée.



**Figure 15 : Emboitage des pierres <sup>(2)</sup>**

**II.2.4. Plafond traditionnel :**

Les pierres sont utilisées également dans la construction des plafonds et des voûtes, elle prend une forme plate étendue, et se pose de manière alignée et proche, fixées par le liants qui est en plâtre pour la plupart des fois, et parfois en mortier de chaux.



**Figure 16 : Plafond traditionnel <sup>(2)</sup>**

**II.2.5. Les parois des puits :**

Le mur formant le puits dans sa partie inférieure se constitue de pierres solides de grande forme, choisies et préparées de façon à ce qu'elles forment une boucle circulaire renforcée (voir planche), il est important de mettre l'accent sur l'emboîtement des pierres et le remplissage et le colmatage des vides à l'aide de sable brut.



**Figure 17 : pierres d'attache à l'intérieur du puits <sup>(2)</sup>**

**II.2.6. Les piliers en pierre :**

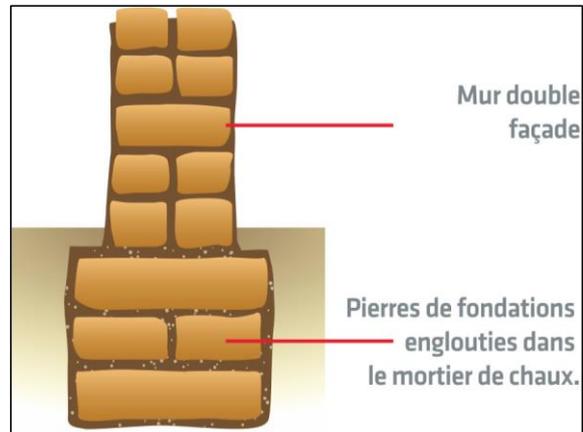
Les piliers constituent un élément essentiel dans la structure de la construction, nous les trouvons au centre de la structure de l'habitation, elles forment ensemble des têtes de formes carrées où se rencontrent les solives principales en bois qui supportent les plafonds. Les poids se répartissent donc de façon équilibrée vers les fondations. Sur le même principe ont été érigés les piliers supportant les arcades et les voûtes dans les mosquées. Ils sont de coupe rectangulaire ou circulaire, la moyenne de ses dimensions est de 50 cm environ. Ils sont construits à l'aide de pierres taillées en plus du mortier de chaux ou du plâtre.



**Figure 18: piliers en pierre de forme rectangulaire <sup>(2)</sup>**

**II.2.7. Les fondations :**

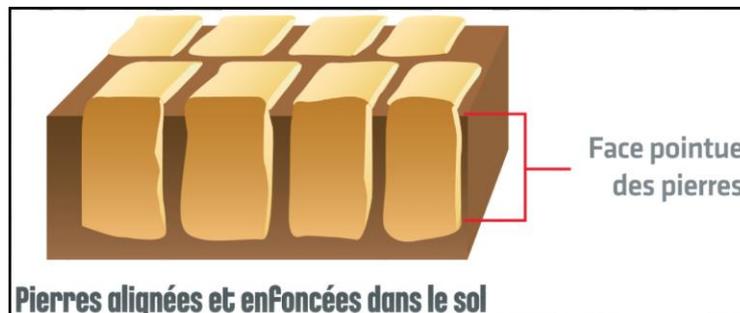
La fouille pour fondation se fait sous forme d'un long tranchet longitudinal, le sable mou est extrait et enlevé jusqu'à l'apparition du bon sol. La pose des fondations soit pour les murs à doubles façades ou à façade unique ou pour les piliers se fait par l'intermédiaire des pierres relativement grandes de taille. Qui sont enfuis dans le mortier de chaux rugueux avec agitation. Les prières sont posées avec précaution et de manière intersectée pour former un bloc homogène sur lequel se répartissent les poids de façon régulière.



**Figure 19: Les fondations (2)**

**II.2.8. Pavage des seguias (ruelles canal) :**

Pour le pavage des seguias de ruissellement nous remarquons que les pierres utilisées sont de forme plate avec une face pointue afin de faciliter son enfoncement et son ancrage dans le sol, ces pierres sont alignées de façon proche sans utilisation de liants d'une manière générale. Nous remarquons également la présence de cette technique pour le pavage du chemin de halage.



**Figure 20: allées du canal (2)**

### **II.2.9. Plafonds de blocs de pierre :**

De grosses pierres sont placées les unes à côté des autres sur le dessus des murs, de petites pierres sont utilisées pour combler les vides, fixées par mortier d'argile.



**Figure 21: Plafonds d'arcs et de voutains en pierre <sup>(3)</sup>**

### **II.3. Types d'utilisations de la pierre :**

Il existe de nombreuses façons d'utiliser les pierres dans le domaine de la construction, car elles sont utilisées par l'homme depuis l'Antiquité de diverses manières, y compris l'utilisation directe et l'utilisation après traitement et transformation. Les plus importantes de ces utilisations sont :

#### **II.3.1. Industrie de divers matériaux de construction :**

Des pierres de toutes sortes ont été utilisées dans la production d'autres matériaux de construction, y compris des types de chaux et le plâtre, d'où sont également extraits des agrégats (sable de gravier), qui sont également utilisés aujourd'hui dans la fabrication de ciment, de béton et de verre.

#### **II.3.2. Toiture en pierres :**

Les plafonds sont les éléments structuraux porteurs horizontaux, qui transfèrent toutes les charges permanentes et temporaires aux éléments structuraux verticaux (colonnes, murs), divisent les bâtiments en différents niveaux, remplissent des fonctions d'isolation thermique et acoustique, réalisent une liaison horizontale entre les éléments de construction et contribuent à leur stabilité et à leur équilibre, et ils se composent de deux couches, la couche structurelle porteuse et la couche de couverture.



**Figure 22 : toiture en pierre, [Les auteurs]**

### **II.3.3. Construction en pierre sèches :**

La maçonnerie sèche est utilisée pour construire les murs extérieurs. Elle consiste à construire des murs épais en posant de grosses pierres sans ajout de mortier, qui forme les parois latérales des cours d'eau (mur de soutènement) et sert également à stabiliser le sol.



**Figure 23: mur de soutènement, [Les auteurs]**

**II.3.4. Pavage en pierre :**

Les pierres ont été utilisées sous différentes formes pour paver les sols des bâtiments et pour paver les routes et les places en raison de leur durabilité et de leur résistance aux charges et aux chocs, Il fait également paraître avec une belle vue spéciale.



**Figure 24 : Pavage des routes en pierre, [Les auteurs]**

**II.3.5. Décoration des façades :**

Les pierres ont également été utilisées pour décorer les murs et autres éléments architecturaux dans différents styles Variété comprenant le gaufrage, la gravure, le revêtement mural, etc.



**Figure 25 : Décoration murale extérieure en pierre, [Les auteurs]**

### **Conclusion :**

Sur la base de ce qui précède, nous devons attacher une grande importance à la préservation de ces bâtiments patrimoniaux, qui sont un trésor précieux d'une grande civilisation qui a traversé les siècles, et à la lumière de ces méthodes et techniques mentionnées, nous devons prêter attention à l'entretien périodique de ces installations et accélérer leur restauration avant leur disparition, grâce à l'utilisation de spécialistes dans le domaine et en utilisant des matériaux de construction locaux, afin de ne pas tomber dans les mauvaises méthodes de restauration et l'utilisation de matériaux de construction modernes tels que le ciment et le gypse qui endommagent le bâtiment et entraînent des dommages.

Comme les anciens matériaux locaux se distinguaient par leur capacité à absorber et à stocker la chaleur et contribuaient à créer une atmosphère douce à l'intérieur de l'habitation, cette conception est considérée comme une fin à la dureté du climat de la région, de sorte que les structures du palais ont été soigneusement mises en œuvre dans les méthodes et techniques de construction et de construction, ce qui leur a donné un caractère particulier dans l'architecture traditionnelle qui caractérise la région de la vallée du Mzab.

## **CHAPITER III**

**L'impact de la haute température sur la pierre de construction**

**Introduction :**

L'importance de la construction en pierre naturelle est principalement liée à son esthétique, sa résistance mécanique et sa durabilité dans le temps, ces études visent à déterminer l'effet de la température élevée et du phénomène de gel et de dégel sur la pierre de construction.

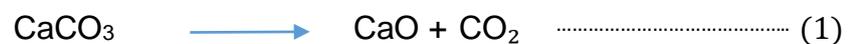
**III.1. Influence de la minéralogie sur le comportement à hautes températures des pierres :**

**A. Transformations physico-chimiques :**

Les pierres naturelles sont en effet des matériaux formés par des minéraux. Afin de comprendre le comportement à hautes températures des pierres, il est nécessaire d'étudier le comportement thermique des minéraux qui les constituent. Les recherches scientifiques se sont intéressées à l'identification des processus physico-chimiques par le biais de différentes analyses thermiques des principaux minéraux qui composent les pierres de construction.

**A.1. Le calcaire :**

C'est un minéral chimique composé de carbonate naturel de calcium de formule **CaCO<sub>3</sub>**. Elle est chimiquement stable jusqu'à une température voisine de 700 °C. A partir de cette température, la réaction de décarbonatation (cf. équation 1) conduit à la libération de **CO<sub>2</sub>** et de **CaO** qui, en contact avec l'eau, va se réhydrater pour donner de la portlandite **Ca(OH)<sub>2</sub>** (cf. équation 2). La décomposition de la calcite est identifiée par un pic endothermique et associée à une perte de masse de l'ordre de 44% lorsque la réaction est terminée vers 900°C. <sup>(4)</sup>



**A.2. Le quartz :**

C'est un type minéral du groupe des silicates, constitué de silice, et de formule chimique **SiO<sub>2</sub>**. (La Figure 26) témoigne de la stabilité des différents polymorphes en fonction de la pression et de la température. À pression atmosphérique, la silice se présente sous la forme de quartz- $\alpha$  jusqu'à 573 °C, puis sous la forme de quartz- $\beta$  jusqu'à 870 °C. Ce changement de phase est réversible et est associé à un changement de réseau cristallin. Les analyses ne témoignent pas d'une perte de masse significative (<1%), cependant un faible pic endothermique peut être observé à 573 °C, température de transition de phase du quartz. <sup>(5)</sup>

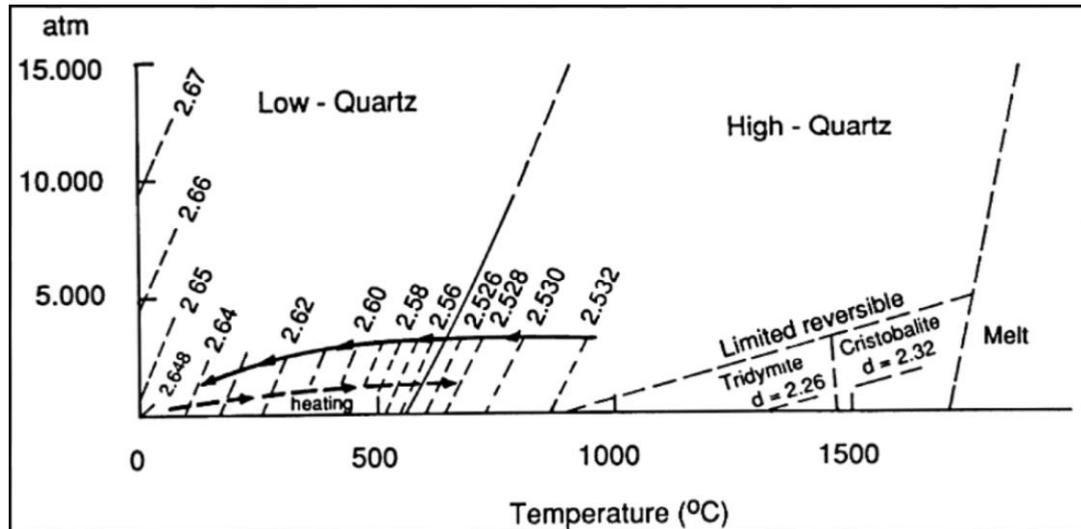


Figure 26 : Diagramme de phase de la silice <sup>(5)</sup>

### B. Changements de couleur associés :

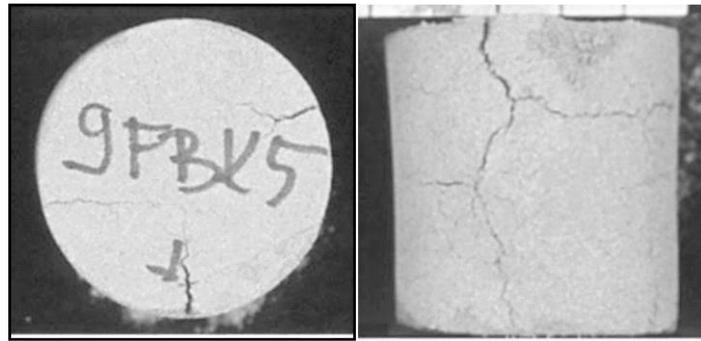
Une exposition à de hautes températures peut entraîner un changement de couleur de la pierre. En effet, certains minéraux présents dans le matériau, peuvent témoigner d'un changement de couleur associé à une transformation minéralogique.

Cette méthode d'évaluation non-destructive est aussi largement employée pour les pierres ayant été exposées à de hautes températures [W.S. González-Gómez et al. 2015; Hajpál & Török, 2004; Ozguven & Ozcelik, 2013; Pires et al. 2014]. Le principe de cette méthode est de comparer la couleur d'une pierre ayant subi un incendie, à des échantillons de la même pierre ayant été chauffés à différents niveaux de température en laboratoire. <sup>(6)</sup>

Les résultats d'études des pierres par les différents auteurs cités ci-dessus ont permis d'identifier les principaux changements de couleur sur les grès et les calcaires.

#### B.1. Le grès :

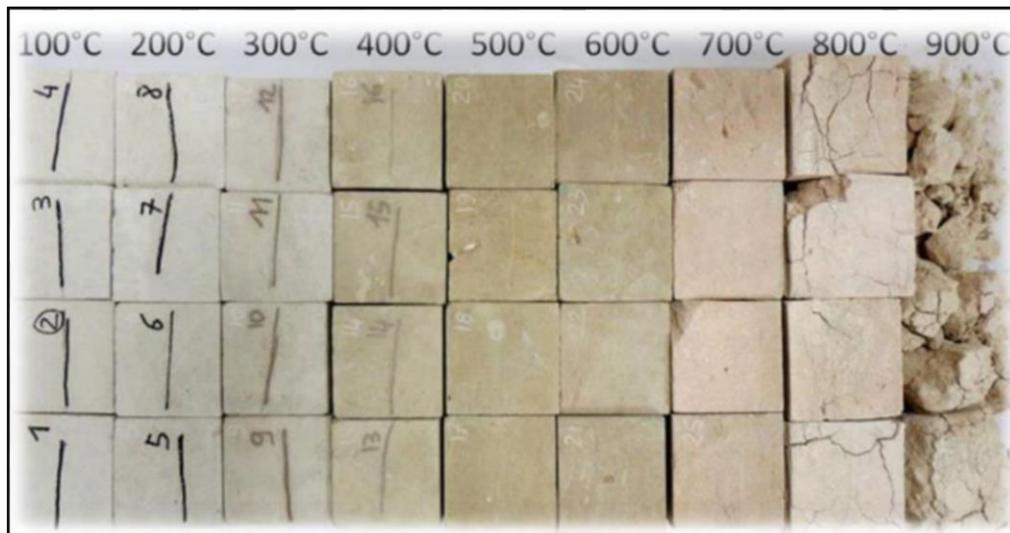
Un changement de couleur au rouge (**phénomène de rubéfaction**) a été observé expérimentalement sur les grès après qu'ils aient été chauffés jusqu'à 900 °C. La décoloration est principalement attribuée aux minéraux contenant du fer (hématite). (La Figure 27).



**Figure 27: Expansion et présence de fissures sur les spécimens de grès de Rorschach quelques jours après les années 900°C <sup>(6)</sup>**

**B.2. Le calcaire :**

Les pierres calcaires contenant de la calcite  $\text{CaCO}_3$  présentent quant à elles, une évolution du changement de couleur en deux phases: un assombrissement de l'échantillon vers une couleur gris sombre, témoignant du début de la décarbonatation (observable dès 600 °C) puis de l'apparition d'une couleur beaucoup plus pure et tendant vers le blanc. Ce dernier phénomène observé dès 800 °C est expliqué par la formation de chaux, résultant de la décomposition de la calcite. <sup>(7)</sup>



**Figure 28 : Changements de couleur d'échantillons soumis à différents traitements thermiques <sup>(7)</sup>**

**C. Dilatation thermique :**

Une température élevée entraîne une déformation de la pierre causée par l'expansion ou la contraction de ses minéraux constitutifs. Apparaît alors le phénomène d'incompatibilité de déformation, lorsque l'ordre de grandeur de la dilatation thermique varie selon les minéraux,

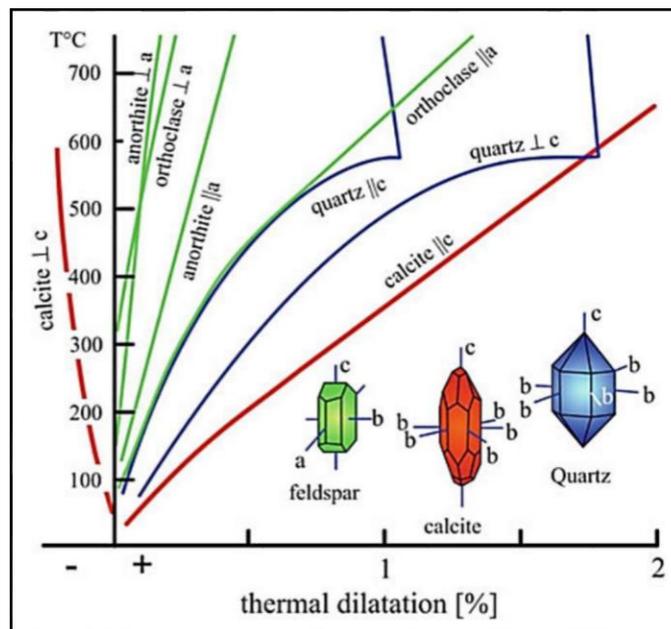
et ce phénomène thermique apparaît comme l'une des principales sources d'endommagement mécanique des pierres. Il faut donc faire attention au comportement des différents minéraux contenus dans les pierres. <sup>(8)</sup>

**C.1. Le calcaire :**

La calcite est un minéral dont le comportement est spécifique puisque sa dilatation linéaire parallèlement à l'axe c'est d'environ 2 % à 600 °C, tandis que perpendiculairement à cet axe, il s'agit d'une contraction de l'ordre de 0.22 % Par conséquent, des pierres contenant de la calcite comme les marbres, sont les plus sensibles lors de cycles thermiques. Ceci est le résultat d'une concentration de contraintes thermiques induites aux joints de grains et qui mènent à la détérioration et fissuration du matériau (cf. Figure 29). <sup>(9)</sup>

**C.2. Le quartz :**

Le quartz est un minéral présentant un comportement thermique bien spécifique. À la pression atmosphérique, il subit un changement de phase à 573 °C en passant d'un état  $\alpha$  à un état  $\beta$ .sa dilatation thermique est anisotrope : elle est environ deux fois plus forte suivant une direction perpendiculaire à l'axe c. De plus, l'évolution générale de la déformation thermique se décompose en deux phases: une dilatation évolutive jusqu'à 573 °C, puis une stabilisation et stagnation de la déformée.



**Figure 29: Déformation thermique linéaire des principaux minéraux <sup>(9)</sup>**

**C.3. Autres rochers :**

Les pierres à texture hétérogène sont moins sensibles à la température puisque qu'elles offrent plus de liberté à la dilatation des minéraux. Ainsi, plus la texture est homogène, et plus la fissuration se développe fortement.

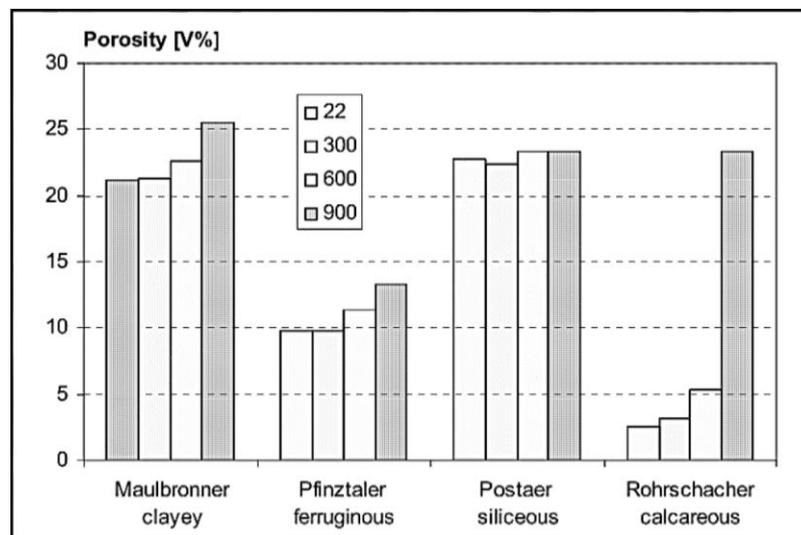
La granularité influence aussi la fissuration dans la mesure où les phénomènes de dilatations thermiques différentielles sont amplifiés avec la taille des grains. Plus la taille des grains est importante, et plus les pierres se dilatent fortement. <sup>(10)</sup>

**III.2. Evolution des propriétés des pierres sous l'effet de hautes températures :**

**A. Propriétés microstructurales :**

**A.1 Porosité totale :**

La Figure 30 présente l'évolution en fonction de la température de la porosité totale accessible à l'eau de quatre pierres ayant des porosités initiales diverses s'étalant de 3% à 23%.



**Figure 30 : Evolution de la porosité totale de diverses pierres après traitements thermiques jusqu'à 900 °C <sup>(10)</sup>**

Observé après traitement thermique à 900 °C :

- Légère augmentation de la porosité en fonction de la température dans la pierre siliceuse Postaer et Pfinztal ferruginous.
- passage de 3 % à 23 % pour la pierre Rohrschacher et 21% à 26% pour la pierre Maulbronner.
- les pierres poreuses sont moins sensibles à la température car elles permettent la dilatation thermique.

L'évolution de la porosité avec la température est dépendante de la stabilité structurelle de la pierre (fissuration) et est liée à la dilatation thermique des minéraux constitutifs. Ainsi, la pierre siliceuse Postaer ne démontre pas de modifications structurelles majeures tandis que les trois autres pierres sont sujettes à la création de nouvelles connexions entre les pores, entraînant alors une élévation de la porosité à travers de la fissuration. Plus la porosité est faible, plus les pierres sont sensibles à la température. <sup>(11)</sup>

**A.2. fissuration et endommagement thermique :**

La fissuration thermique comprend à la fois la création de nouveaux vides et l'élargissement des vides préexistants, ce qui implique une augmentation de la porosité.

Les pierres étant des matériaux naturels pouvant contenir plusieurs types de minéraux, des contraintes d'origine thermique inter granulaires et intra granulaires de traction et de compression peuvent se développer. Si ces dernières dépassent la résistance à la rupture du matériau, des fissures inter granulaires et intra granulaires se produisent. L'étude de [Fredrich & Wong, 1986] <sup>(12)</sup> établit pour une pierre donnée, une relation estimant la surface de fissure créée S par unité de volume (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) en fonction de l'amplitude du traitement thermique:

$$S = \frac{E}{1-\vartheta} \frac{(\Delta\alpha \times \Delta T)^2}{8\tau} \dots\dots\dots (3)$$

Où E: module d'élasticité en Pa.

$\vartheta$  : Coefficient de Poisson.

$\Delta\alpha$ : Différentiel de coefficient de dilatation thermique linéaire en °C<sup>-1</sup>.

$\Delta T$ : Intensité du gradient thermique en °C.

$\tau$ : Densité surfacique d'énergie, qui correspond à l'énergie nécessaire à la propagation d'une fissure en J/m<sup>2</sup> (généralement, égale à 7,5 3/m<sup>2</sup>).

Cette relation (cf. équation 3) montre donc que la fissuration dépend de l'intensité du gradient thermique, mais aussi des propriétés intrinsèques à la pierre (paramètres mécaniques et thermiques). Les observations faites par microscopie électronique à balayage montrent ce qui suit :

- pour les pierres cristallines de faible porosité, la température induit essentiellement des microfissures inter cristallines.
- Des fissures intra cristallines sont également formées mais elles ne développent fortement qu'à partir de 600 °C, dans ce cas-ci (granite).

- la densité de microfissures intra cristallines est constante jusqu'à 450 °C et augmente fortement pour un traitement dès 650 °C; ce qui s'explique par la transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  à 573 °C, augmentant considérablement la fissuration résiduelle. <sup>(13)</sup>

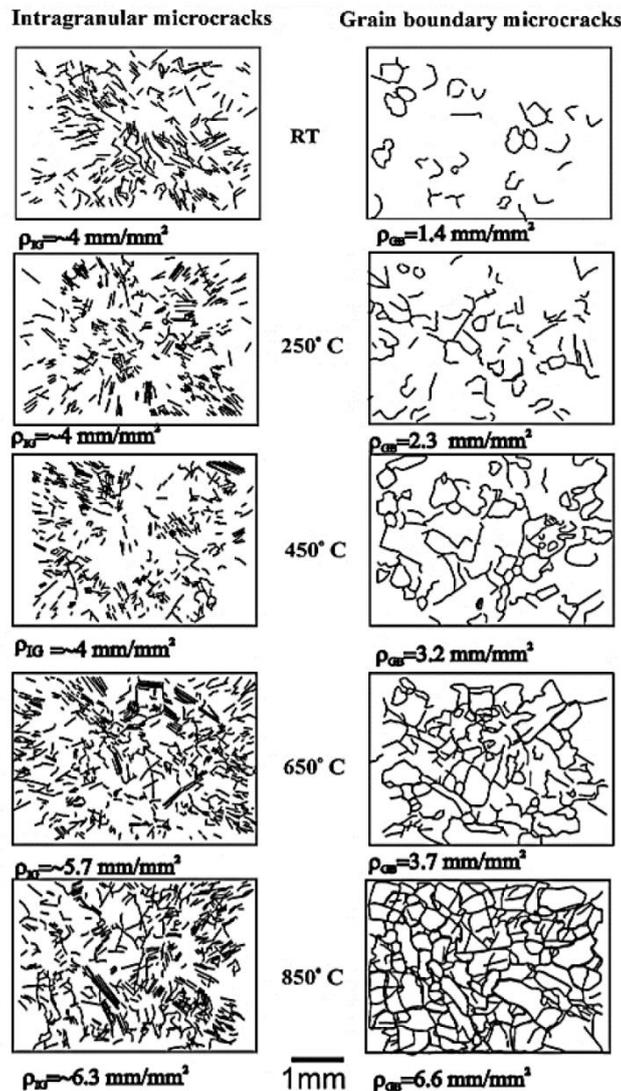


Figure 31 : Evolution des microfissures inter et intra-granulaires dans un granite soumis à différents traitements thermiques jusqu'à 850 °C (vitesse de chauffage 1,5 °C.min<sup>-1</sup>) <sup>(13)</sup>

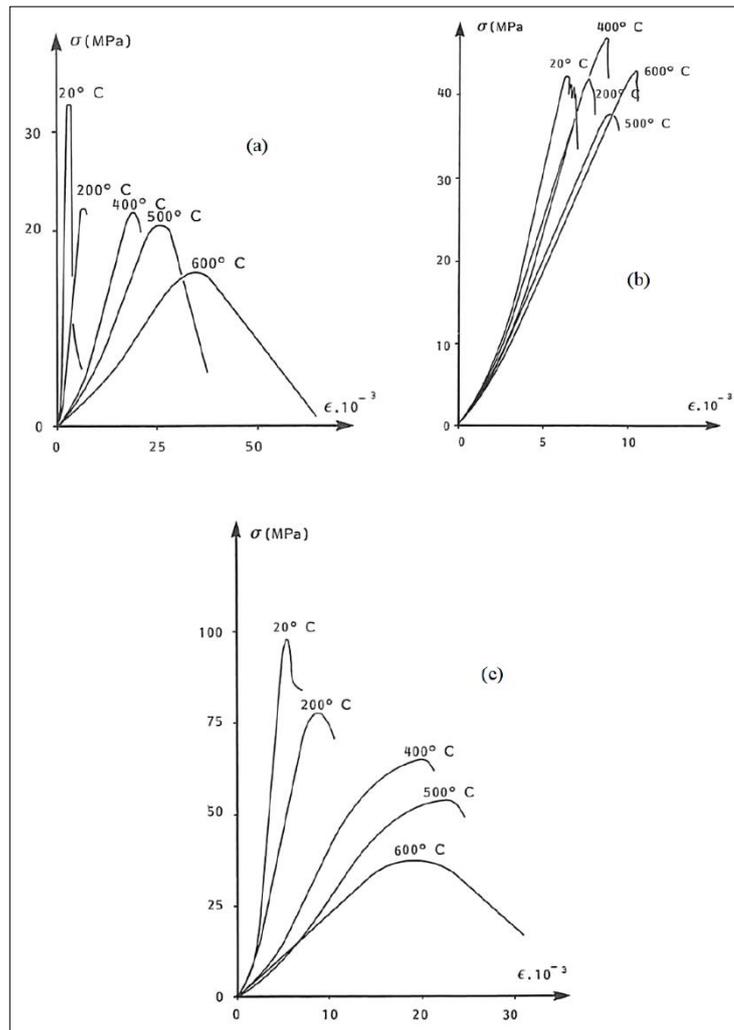
- La microfissuration sur des échantillons soumis à des traitements thermiques peut être caractérisée par des observations au microscopique à électronique à balayage, mais aussi par des mesures de la vitesse des ondes  $\rho$ . Ces différents auteurs observent une diminution de ce paramètre en fonction de la température, et relient son évolution à celle de la densité de fissuration.
- L'analyse statistique de la microfissuration thermique sur des photos indique de façon générale que la densité de fissuration augmente avec la température. <sup>(14)</sup>

**B. Propriétés mécaniques :**

**B.1. Résistance en compression :**

Une élévation de la température amène une diminution de la résistance en compression causée par l'endommagement thermique de la pierre à travers de la fissuration. Les résultats sur l'évolution des propriétés mécaniques et notamment le comportement en compression à hautes température de diverses pierres sont nombreux.

La Figure 32 présente l'évolution des courbes de contrainte-déformation au cours du chauffage de trois différents types de pierres: un calcaire, un grès et un marbre.



**Figure 32 : Courbes contrainte-déformation en compression simple à chaud à différentes températures: (a) Pierre calcaire d'Euville; (b) Grès des Vosges; (c) Marbre de Carrare <sup>(14)</sup>**

Les résultats suivants ont été obtenus :

- la pierre calcaire d'Euville et le marbre de Carrare présentent une diminution de la résistance en compression en fonction de l'élévation de la température.
- le marbre de Carrare affiche une perte de résistance mécanique étroitement liée à l'évolution graduelle de la température.
- le calcaire d'Euville présente une diminution soudaine de la résistance en compression à 200 °C, qui reste la même jusqu'à 500 °C, puis qui rediminue à 600 °C.
- Pour le grès des Vosges, il ne semble pas affecté par l'élévation de température : les valeurs de résistance à la compression ne montrent pas de diminution significative, voire une légère augmentation à 400 °C.
- La différence de comportement observé entre le calcaire et le marbre semble résider dans la taille des cristaux, mais semble être aussi lié à la porosité initiale de ces deux pierres : 17% pour le calcaire d'Euville contre une porosité quasi-nulle pour le marbre de Carrare.

Finalement, concluent que la calcite est un minéral particulièrement sensible à la température et que la résistance aux sollicitations thermiques est très variable et dépend de leur structure: porosité initiale, taille et arrangement de grains. La température semble, dans ce cas, avoir une influence plus significative sur l'évolution du module d'élasticité que sur la valeur de la résistance en compression. <sup>(15)</sup>

L'ensemble de ces observations permet de déduire le caractère prédominant de la porosité, de la texture et de la granularité sur l'évolution du comportement mécanique à haute température et en particulier la résistance à la compression. De plus, la diminution de la résistance à la compression est principalement causée par la fissuration thermique et est liée à la fois aux essais à chaud et aux essais résiduels effectués sur des pierres pré fissurées thermiquement. <sup>(16)</sup>

### **B.2. Résistance en traction :**

On peut souligner le travail de (Ozguven & Ozcelik, 2014) qui traite de l'évolution de ce paramètre mécanique jusqu'à 1000 °C. Les pierres étudiées sont constituées de quatre calcaires et de quatre marbres dont l'évolution de la résistance à la compression est discutée (cf. figure 33).

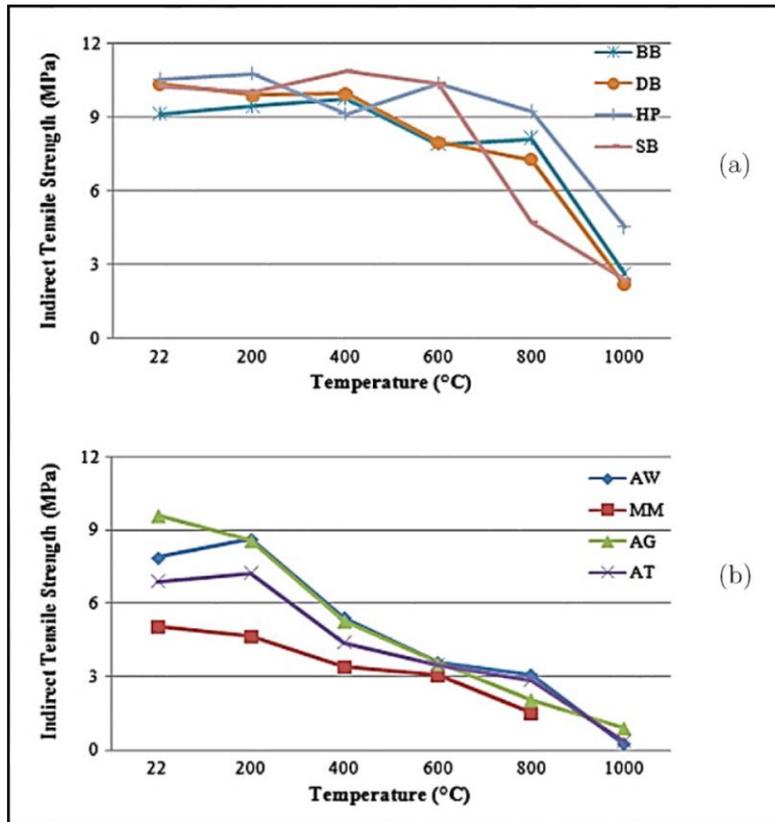


Figure 33: Evolution de la résistance en traction de (a) pierres calcaires et (b) marbres en fonction de la température <sup>(16)</sup>

Les résultats suivants ont été obtenus :

- L'évolution de la résistance en traction est similaire pour ces quatre calcaires, qui étant très peu poreux (< 4 %).
- Les pierres présentent une très bonne stabilité thermique en ne montrant pas de chute évidente à partir de 800 °C, et en montrant une chute significative (60 à 70%) à 1000 °C
- On observe une surchauffe, avec des pertes importantes: 50% à 400 °C, et 90 à 100% à 1000 °C.
- La résistance à la traction diminue avec l'augmentation de la température.
- Des changements soudains n'ont été observés à aucune des températures.

En conséquence, les endroits où des pierres naturelles sont utilisées ont acquis une grande importance en raison de la diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température. Les pierres de construction doivent être utilisées en tenant compte des problèmes de sécurité dans les endroits où des températures élevées sont susceptibles d'atteindre. <sup>(17)</sup>

**C. Propriétés de transfert :**

L'altération des pierres naturelles de construction lorsqu'elles sont exposées à de hautes températures est fortement liée aux transferts thermiques et hydriques qui ont lieu en son sein.

**C.1. Thermique  $\lambda$  :**

Les propriétés thermiques des pierres sont affectées par une élévation de la température et dépendent de plusieurs paramètres : la composition minéralogique, la porosité. Ainsi, lors d'une exposition thermique sévère, la dilatation des minéraux constitutifs va modifier une partie de la structure porales des pierres, et cette densification de la fissuration va entraîner des variations des propriétés thermiques.

La conductivité thermique est définie comme la grandeur physique permettant de quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface, et par unité de temps sous l'action d'une différence de température entre les deux extrémités d'un échantillon de ce corps. La composition minéralogique, et notamment la phase minérale dominante, joue un rôle prépondérant sur la valeur initiale et l'évolution de ce paramètre thermique. De plus, la porosité influence fortement la conductivité thermique d'une pierre. <sup>(18)</sup>

Rock-forming mineral	$\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Rock-forming mineral	$\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Quartz- $\alpha$	7.69	Magnetite	5.10
Quartz-mean	6.5	Hematite	11.28
Zircon	5.54	Calcite	3.59
Serpentine	3.53	Dolomite	5.51
Clay minerals	2.9	Anhydrite	4.76
Feldspar	2.3	Gypsum	1.26
Apatite	1.38	Organic materials	0.25

**Tableau 1 : Conductivité thermique des principaux minéraux <sup>(18)</sup>**

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Le grès riche en quartz est plus conducteur que le calcaire
- Le marbre avec une porosité presque nulle est plus conducteur que le calcaire avec une certaine porosité.
- L'énergie que la matière absorbe ou récupère pour élever ou abaisser sa température, son évolution en fonction de la température dépend de ses composants.

**C.2. Hydrique (perméabilité à l'eau) :**

Une exposition des pierres à de hautes températures conduit généralement à une modification de la microstructure porale et à une densification thermique du matériau causée principalement par des phénomènes de dilatation thermique différentielle. Ainsi, les propriétés de transfert de fluide subissent ces modifications et peuvent présenter des évolutions diverses en fonction de la température.

Les valeurs d'absorption d'eau des échantillons chauffés à partir de la température ambiante jusqu'à 1000 °C ont été progressivement mesurées et les résultats sont illustrés à la figure 12. <sup>(19)</sup>

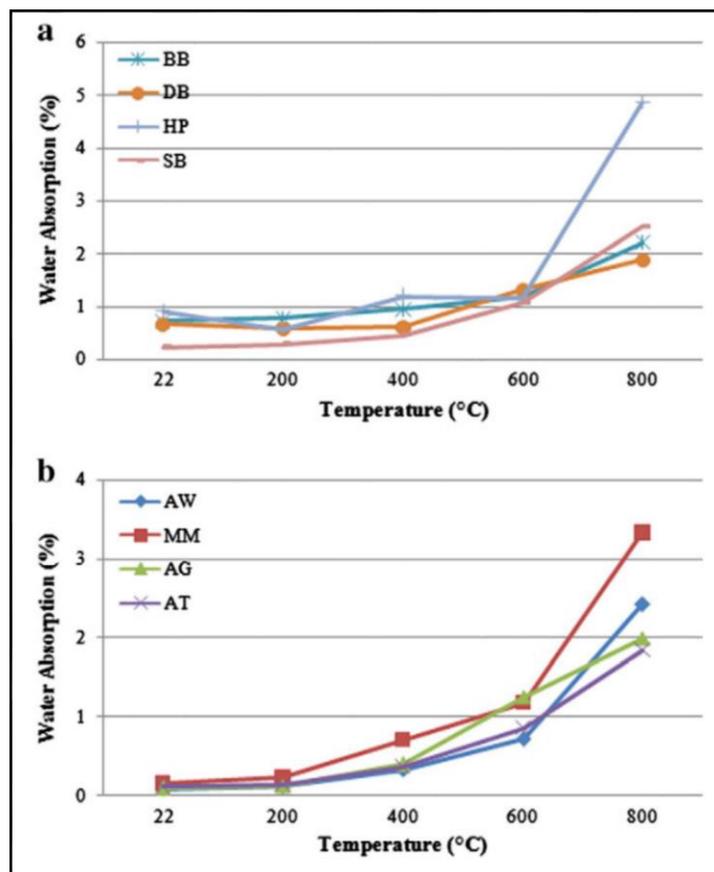


Figure 34 : L'effet de la température sur le taux d'absorption d'eau: a) calcaires, b) marbres. <sup>(19)</sup>

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Les valeurs d'absorption d'eau augmentent en proportion directe avec l'exposition à la température des pierres naturelle.
- Initialement, ce rapport est faible mais à mesure que la température augmente, une augmentation significative est observée dans le taux d'absorption d'eau.

- La différence de température et l'absorption d'eau sont des propriétés parallèles du calcaire. La variation du taux d'absorption d'eau a augmenté d'environ la même quantité.
- L'échantillon HP a montré la même tendance avec d'autres calcaires jusqu'à 600 ° C tandis que le taux d'absorption d'eau a encore augmenté à 800 °C.
- Dans le marbre, les variations du taux d'absorption d'eau sont parallèles les unes aux autres.

**Conclusion :**

Les résultats issus de la littérature, présentés dans ce Chapitre III, ont permis d'établir un état de l'art concernant l'influence de la température sur le comportement des pierres de construction.

En effet, les hautes températures ont une double influence sur les pierres. D'une part, elles provoquent des transformations physico-chimiques des minéraux constitutifs des pierres. Ces modifications minéralogiques peuvent s'accompagner d'une perte de masse et entraîner un désordre au niveau de la stabilité structurelle de la pierre. D'autre part, la température induit des déformations thermiques. La pierre naturelle, étant un matériau poly minéral, peut présenter des problèmes d'incompatibilité de déformation liés à des comportements thermiques différents des minéraux constitutifs. Il en résulte des contraintes mécaniques générées au contact des grains, entraînant la fissuration et un état d'endommagement général du matériau.

L'évolution des propriétés des pierres sous l'effet de la température a également été discutée. Il en ressort que la température altère les pierres en fonction de l'intensité du traitement thermique, et que les propriétés physico-mécaniques montrent une évolution difficilement généralisable. Néanmoins, la déformation thermique entraîne une densification de la fissuration, ce qui se traduit par une modification de la microstructure de la pierre. Les performances mécaniques sont également modifiées et subissent des diminutions plus ou moins importantes en fonction de la nature de la pierre et de ses propriétés intrinsèques initiales.

Les pierres carbonatées, telles que les calcaires et les marbres, sont considérées comme sensibles à la température, car la décomposition de la calcite, la phase minérale dominante de ce type de pierre, se produit dès 700 °C, ce qui entraîne une perte de masse significative et conduit à un état d'altération avancée. En revanche, les grès affichent une stabilité chimique et structurelle satisfaisante jusqu'à des températures d'environ 600 °C, où le quartz subit une transformation minéralogique réversible.

## **CHAPITER IV**

**L'impact du phénomène de gel-dégel sur la pierre de construction**

**Introduction :**

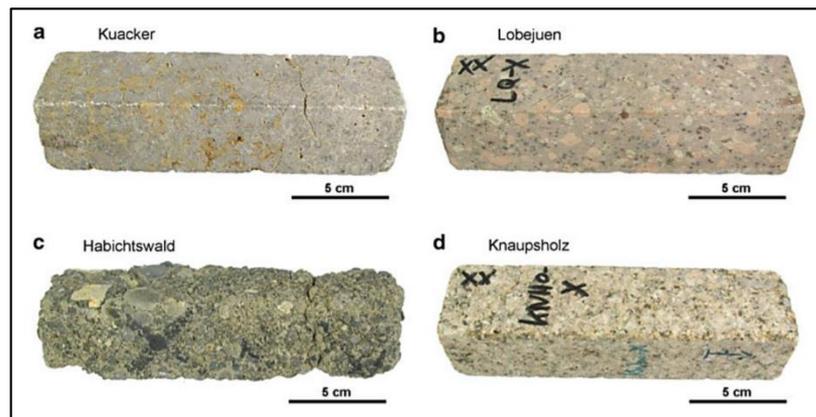
Les pierres naturelles, employées largement comme matériaux de construction dans les monuments historiques, peuvent témoigner d'une altération liée à une exposition à des conditions climatiques sévères, alliant des variations cycliques de température à une saturation en eau du matériau. La détérioration par cycles de gel-dégel de la pierre peut alors se présenter sous différentes formes fissurations, desquamation, éclatement et gonflement

Ce Chapitre IV présente une revue bibliographique concernant l'altération par phénomène de gel-dégel des pierres de construction utilisées dans le patrimoine bâti.

**IV.1. Evolution des propriétés des pierres après des cycles de gel-dégel :**

**A. Endommagement à l'échelle macroscopique et microscopique :**

L'endommagement des pierres, causé par des sollicitations au gel-dégel, peut prendre différentes formes d'altération selon l'intensité du gel, le nombre de cycles soumis, le degré de saturation en eau mais est surtout fonction de la sensibilité du matériau vis-à-vis de ce type d'exposition à basse température. Ainsi, des échantillons ayant subi expérimentalement des cycles de gel-dégel peuvent présenter des désordres de natures diverses, et ce à différentes échelles.

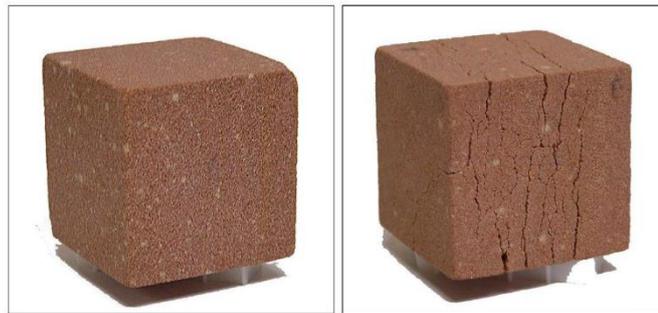


**Figure 35 : Durabilité au gel-dégel de quatre pierres diverses <sup>(20)</sup>**

[Ruedrich et al. 2011] s'intéressent à la durabilité de quatre pierres de construction face à des sollicitations de gel-dégel à très long terme (1400 cycles). Ces matériaux présentent des caractéristiques physico-mécaniques bien diverses à l'état sain: porosité allant de 2 % à 21 %, et résistance en traction entre 2 et 12 MPA. A l'issue des 1400 cycles de gel-dégel, ces quatre pierres témoignent d'un état visuel d'endommagement bien différent. <sup>(20)</sup>

- La pierre (b) ne présente aucune trace visible d'altération à l'œil nu.
- Les échantillons de pierre (a) et (d) présentent de grandes fissures et une surface bien altérée.
- La pierre (c) qui est la plus sensible au gel-dégel, avec une porosité élevée (21 %) et de faibles résistances mécaniques, a commencé à se désintégrer avant la fin des 1400 cycles.

La Figure 36 affiche l'évolution de l'état d'endommagement d'un bloc cubique d'un grès Vosgien après trois séries de 30 cycles de gel-dégel à saturation totale [Thomachot, 2002] constate une fracturation du bloc de grès s'accompagnant de désagrégation des grains. La fracturation s'étend perpendiculairement à la stratigraphie. Des fractures progressives et se ramifiant à travers toute l'éprouvette avec un fort dessertissage des grains sont clairement observées. <sup>(21)</sup>



**Figure 36 : Evolution de l'état visuel d'endommagement d'un grès Vosgien après gel-dégel** <sup>(21)</sup>

### **B. Propriétés mécaniques :**

De manière générale, il est admis que l'endommagement par gel-dégel subi par les pierres de construction va entraîner une perte des performances mécaniques de celles-ci. Ainsi, il est attendu une diminution de la résistance en compression, du module d'élasticité ou encore de la résistance en traction.

Dans un rapport de recherche du Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) traitant de la gélivité des roches, [Tourenq, 1970] établit une répartition statistique de l'évolution des résistances en compression de plus de 350 échantillons selon leur porosité initiale. Il définit l'évolution de ce paramètre, après 25 cycles de gel-dégel, selon l'intensité de la chute ou de l'augmentation de résistance mécanique (cf. Tableau 2). <sup>(21)</sup>

Porosité %	Chute de résistance (%)				Augmentation de résistance (%)		
	> 40	20/40	10/20	0/10	0/10	10/20	20/30
0 à 5	5,5	18,2	25,6	26,5	13,7	6,3	3,2
5 à 10	27,5	20	26	11,1	13,4	0	2,2
10 à 20	34	41	11,8	8,4	0	2,2	1,4
> 20	46,7	18,1	12,3	14,8	0	6,5	1,6

**Tableau 2 : Répartition par niveaux de l'évolution relative des résistances en compression selon la porosité totale des pierres à l'état sain <sup>(21)</sup>**

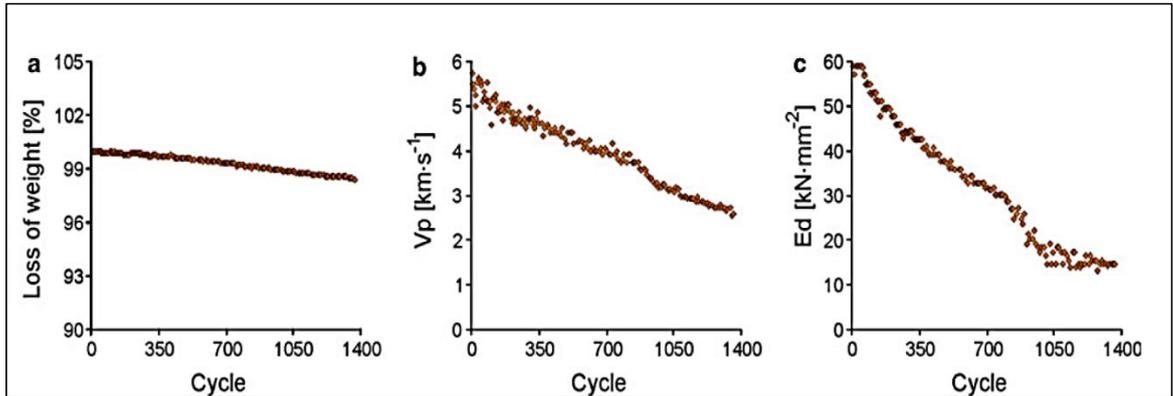
- Il a été constaté que le gel provoque une diminution de la résistance à la pression, et que les cas d'une faible augmentation de la résistance ne doivent pas être pris en compte.
- Cette répartition en fonction de la porosité montre que les matériaux les plus poreux ont beaucoup plus de chances de se montrer sensibles au gel.
- 47 % des pierres ayant une porosité supérieure à 20 % affiche une chute de résistance supérieure à 40 % tandis que les diminutions de résistances des pierres peu poreuses (0 à 5 %) se situent davantage autour de valeurs inférieures à 20 %.

### **C. Propriétés physiques**

Tout comme les propriétés mécaniques, les pierres vont afficher une modification de leurs propriétés physiques témoignant de l'altération et de la modification structurale induite par les différents mécanismes d'endommagement du gel-dégel. L'analyse des résultats permet d'identifier les évolutions clés de certains paramètres physiques : perte de masse, volume apparent, vitesse d'onde P et module d'élasticité dynamique.

(La Figure 37) présente l'évolution de trois paramètres physiques d'une des pierres. Cette pierre définie comme moyennement sensible au gel affiche tout de même une diminution de plus de 70 % du module d'élasticité dynamique malgré une perte de masse quasi-nulle. Ainsi, la perte de masse liée à l'altération par gel-dégel n'apparaît pas comme un indicateur très révélateur de l'endommagement du matériau. Un état d'endormement avancé, évalué par une perte importante de résistance mécanique, peut ne présenter qu'une très faible perte de masse. En effet, contrairement à des sollicitations thermiques à hautes températures qui font intervenir des modifications minéralogiques, les essais de vieillissement artificiel à basse température reproduisant les cycles de gel-dégel ne témoignent que très rarement de perte de masse significative. Seul un niveau d'endommagement élevé, où les performances mécaniques sont

alors quasi-réduites à néant, présente des pertes de matières importantes, liées à une déstructuration complète de la pierre. <sup>(22)</sup>



**Figure 37 : (a) Evolution de la perte de masse; (b) Evolution de la vitesse des ondes P; (c) Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction du nombre de cycles de gel-dégel <sup>(22)</sup>**

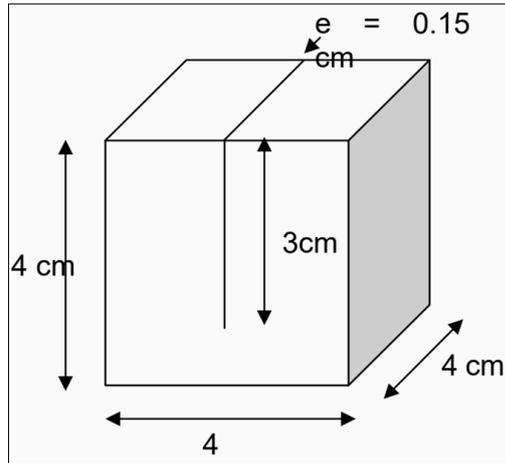
#### **D. Propriétés microstructurales :**

Dans ses travaux de thèse, [Thomachot, 2002] réalise des analyses de porosimétrie au mercure sur deux types de grès, altérés par des cycles de gel-dégel, et arrive à constat similaire. Tout d'abord, elle note une légère augmentation de la porosité de 2 % après 50 cycles. Puis, elle observe une forte augmentation de la proportion relative de la porosité dont les pores sont inférieurs à 7,5 µm passage de 36 % à 72 %. L'auteur remarque aussi une diminution progressive de la valeur du coefficient de dispersion  $C_D$ . <sup>(23)</sup>

### **IV.2. l'impact du phénomène de gel-dégel sur la pierre de construction :**

#### **➤ Principe de l'essai :**

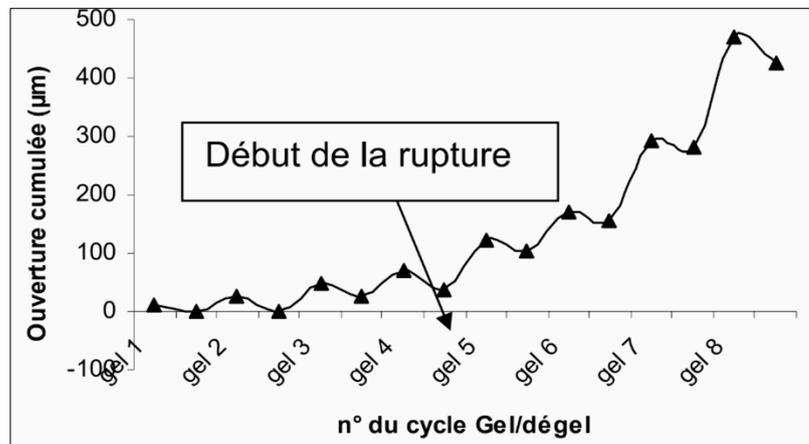
Pour caractériser cette cinétique, nous avons fait le choix d'une démarche expérimentale qui consiste à reproduire le phénomène d'avancement de fissure sous l'effet du gel à l'extrémité d'une unique entaille que nous avons générée dans un bloc de calcaire. Un bloc de calcaire Larrys perlé cubique (4cm de côté) a été testé. Par l'intermédiaire d'un trait de scie, une entaille de 3 cm de profondeur pour 0,15 cm d'épaisseur (Figure 38) a été créée. Aucun soin particulier n'a été accordé au fond de l'entaille lors de son façonnage. Les extrémités latérales ont été étanchées par un produit souple et un joint torique chargé de reprendre la contrainte. L'entaille étant remplie d'eau, le cube a été soumis à des cycles successifs de gel-dégel jusqu'à sa rupture.



**Figure 38 : Schéma du bloc façonné**

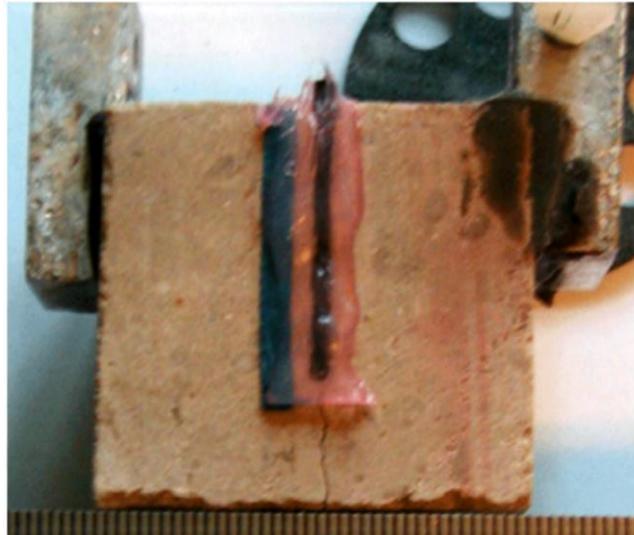
**Résultats de l'essai :**

- les premiers résultats répétables indiquent que la propagation de la fissure dans ce calcaire ne s'initie qu'au bout d'un certain nombre de cycles de gel-dégel (4 cycles) (Figure 39). <sup>(24)</sup>



**Figure 39 : Courbe de charge/décharge de l'entaille du 1er cycle de gel/dégel à la rupture <sup>(24)</sup>**

- Un nombre de cycles supplémentaires (4 cycles) permet de fissurer complètement la pierre selon une ligne de fissuration dans le prolongement de l'entaille initiale (Figure 40).



**Figure 40 : Eprouvette de Larrys perlé après rupture <sup>(24)</sup>**

**Conclusion :**

la revue bibliographique présentée dans ce Chapitre IV, a permis de détailler les aspects théoriques des mécanismes de détérioration par phénomène de gel-dégel, pouvant affecter les pierres de construction.

La nature du milieu poreux (structures de porosités, propriétés de transferts et propriétés mécaniques), le mode de saturation (totale, partielle) ainsi que les conditions de gel (température minimale, vitesse de gel) contrôlent la dynamique de prise en glace et donc le développement des contraintes lors du gel. La gélifraction du matériau est alors la conséquence d'un phénomène de fatigue mécanique causé par une alternance de cycles de dilatation-contraction qui mène à la rupture de la pierre.

Des résultats expérimentaux sont présentés afin de comprendre les conséquences de l'exposition à la fonte des glaces sur l'évolution des propriétés de la maçonnerie. Les dommages causés peuvent entraîner des propriétés physiques différentes telles que la vitesse des ondes P montrant une diminution. Les performances mécaniques peuvent également être affectées et diminuer en raison de la modification de la microstructure et du développement de fissures dans la pierre

# PARTIE B : ÉTUDE PRATIQUE

## CHAPITRE V

### Méthode et Protocol expérimenta

**Introduction :**

Ce Chapitre V présente la démarche expérimentale adoptée pour la réalisation des travaux de recherche au sein du Laboratoire Des Travaux Publics Du Sud (LTPS).

Tout d'abord, une description brève des pierres choisies met en avant leur large utilisation dans les monuments historiques du Ksar El-Guerrara. Le choix de l'étude de ces pierres de construction est justifié en se rapportant au contexte patrimonial national.

Par la suite, l'étape de préparation et d'échantillonnage des éprouvettes de pierre est exposée. Le principe de fonctionnement des différentes techniques utilisées durant cette thèse, permettant la caractérisation expérimentale des propriétés intrinsèques des pierres, est présenté avec les protocoles suivis lors de la conduite des essais. Finalement, les deux campagnes expérimentales visant à reproduire une sollicitation à des conditions thermiques, hautes et basses températures, sont détaillées.

**V.1. Présentation de site d'étude " Ksar El-Guerrara" :**

**V.1.1. Localisation géographique du Ksar El-Guerrara :**

Ksar El-Guerrara est situé à l'intersection de la latitude nord **32°** et de la latitude sud **30°**. La longitude est de **43°** à l'ouest et de **45°** à l'est, et à une altitude de **530m** au-dessus du niveau de la mer. Il se trouve sur une superficie estimée à : **813,06 Km²**. (25)



**Figure 41: Localisation géographique de Guerrara** (25)

### V.1.2. Localisation administrative du Ksar El-Guerrara :

Guerrara est située à **80 km** au nord-est de Ghardaïa, et à environ **180 km** de la wilaya de Touggourt, elle est bordée au nord par la commune de Guettara de la wilaya de Djelfa, à l'est par la commune d'El Alia de la wilaya de Ouargla, à l'ouest par la commune de Berriane de la wilaya de Ghardaïa, et la commune de Hassi Delaa de la wilaya de Laghouat, et au sud La commune de Zelfana est de la wilaya de Ghardaïa, et elle est situé à l'extrême nord du territoire de la wilaya de Ghardaïa, puisqu'il n'est qu'à **10 km** de la frontière sud de la wilaya de Djelfa. <sup>(25)</sup>

### V.1.3. Description du Ksar El-Guerrara :

Ksar El-Guerrara revêt une importance particulière dans la vallée du M'Zab, car c'est le premier groupe résidentiel à mettre pied loin de la vallée du M'Zab, à une distance d'environ **100 Km**. Sa population en **2020** est d'environ **85000 habitants**. El-Guerrara se distingue par son ancienne mosquée surmontée d'un minaret de forme pyramidale, célèbre pour son marché traditionnel et ses vastes oasis, ainsi que par le barrage d'Al-Fosaea, achevé en **1710**, la Ksar est classé au patrimoine national en **1998**. <sup>(25)</sup>



Figure 42 : barrage d'Al-Fosaea <sup>(25)</sup>

### V.1.4. Histoire du Ksar El-Guerrara :

Nous mentionnons également que la zone contient des ruines et des vestiges de palais éteints tels que la Ksar "**Azeqagh**" et la Ksar "**Lambertakh**", antérieurs à la fondation du Ksar El-Guerrara en **1630**, la Ksar est situé au sommet d'une petite montagne et la mosquée à son sommet, puis les maisons qui l'entourent suivent une forme pyramidale sur les quatre côtés,

entourées d'un mur et de tours de garde, et le mur de Guerrara a été renouvelé et agrandi trois fois, et après l'indépendance, la ville s'est étendue au-delà du troisième mur et le mur entourant la ville n'a pas été renouvelé pour améliorer les conditions de sécurité dans la région.

### **V.1.5. Bâtiments du Ksar El-Guerrara :**

La plupart des maisons du Ksar sont construites en pierres, à l'exception des anciennes, elles sont construites en argile, la plupart d'entre elles se composent d'un étage "R+1", j'ai utilisé du matériau Timchemt dans la construction, qui est un type de chaux souvent utilisé localement, résultant de la transformation des pierres à l'aide de fours.

## **V.2. Présentation de cas d'étude " Les tours et le rempart défensif du Ksar El-Guerrara" :**

### **V.2.1. Histoire des tours et des remparts du Ksar El-Guerrara :**

L'histoire de la construction des tours et des remparts défensifs du Ksar El-Guerrara remonte à sa fondation en **1631**. En raison de l'afflux de familles et de résidents des pays voisins pour s'installer à l'intérieur ou à l'extérieur de ses murs, les habitants de la région ont agrandi les remparts de la ville à trois reprises. <sup>(25)</sup>, dont le dernier était le rempart étudié et a été construit en **1917**.



**Figure 43 : Rempart défensif du Ksar El-Guerrara <sup>(25)</sup>**

**V.2.2. Description Les tours et le rempart défensif du Ksar El-Guerrara :**

Le quatrième rempart a maintenant plus de **100 ans**. Il contient la ville du côté ouest, avec une longueur d'environ **320 m**, une hauteur de **4 m** et une largeur de **40 cm**. Il contient deux tours. Les remparts et les tours ont été construits avec des pierres et de la chaux. Et avec une géométrie soignée, notamment dans le choix de leur emplacement.



**Figure 44: Le quatrième rempart, [Les auteurs]**

**V.2.3. L'importance des tours et le rempart défensif :**

Les remparts et les tours constituent une partie intégrante de la structure architecturale pour les Ksour de la vallée du Mزاب. Les remparts constituent la façade défensive alors que les tours font office d'installations de guet. Elles se distinguent par leur hauteur qui favorise la communication entre elles. Plusieurs tours se répandent tout au long des lits des oueds à titre de postes avancés reliant et intégrant le champ de vision entre les ksour et les palmeraies et disposent d'une vue sur les lits de ruissellement principaux.

**V.2.4. Technique de construction de ces remparts :**

Les remparts ont été édifiés à l'aide de matériaux locaux qui sont les pierres et le mortier de chaux. De point de vue forme nous remarquerons qu'en général, la base du rempart est large par rapport au sommet et se rétrécit graduellement en allant vers le haut.

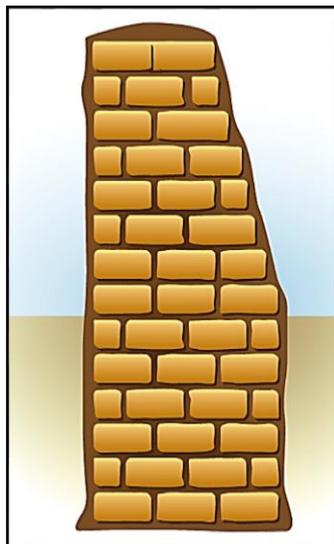
Il existe vraisemblablement deux méthodes de construction de ces remparts

➤ **Première méthode :**

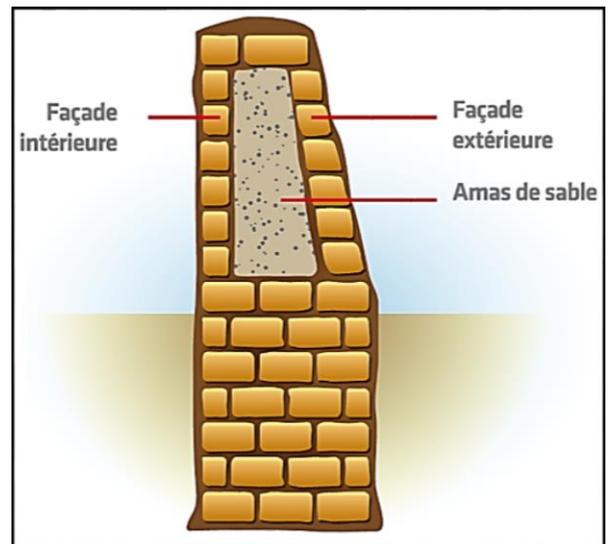
Le rempart est édifié en entier de la base au sommet comme un seul bloc de pierres soigneusement entreposées avec l'aide du mortier de chaux comme liant d'attache. Les pierres grandes de taille sont déposées à la base, ensuite, les dimensions se rétrécissent graduellement en allant vers le sommet. En haut du rempart est posée une couche courbée de mortier de chaux servant de protection contre les eaux pluviales (cf. Figure 45). <sup>(27)</sup>

➤ **Deuxième méthode :**

Le rempart est constitué de deux faces construites en pierres et au mortier de chaux qui se reposent sur une base rocheuse solide. Le vide ou le creux contenu entre les deux murs est remplis et comblé par le sable. La largeur du rempart se rétrécit entre la base et le sommet en allant vers le sommet. En haut du rempart est posée une couche courbée de mortier de chaux comme protection contre les eaux pluviales (cf. Figure 46).



**Figure 45 : Rempart défensif se composant d'un seul bloc de pierres**



**Figure 46 : Rempart défensif se composant de deux faces** <sup>(27)</sup>

**V.3. Critères de prélèvement des échantillons :****V.3.1:But et principe de l'échantillonnage :**

Le processus consistant à prélever des échantillons de matériaux de construction de base (pierre) dans des bâtiments historiques et à procéder à leur examen et à leur analyse pour identifier leurs composants est une étape importante dans la préservation des bâtiments et sites archéologiques et historiques. Les résultats obtenus grâce à l'utilisation de diverses méthodes d'examen et d'analyse aident beaucoup à orienter le processus de préservation vers la bonne voie, car ils aident à identifier les composants du matériau, et donc à choisir les matériaux de restauration appropriés, et cela aide également à identifier certaines des causes de dommages qui ont conduit à la détérioration du matériau de construction.

Le prélèvement d'échantillons se pratique en deux temps :

- Une quantité beaucoup plus importante de matériel est prélevée sur le site d'étude que celle qui sera utilisée pour le test réel.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

**V.3.2. Prélèvement sur le mur ancien (pierre) :**

Un grand échantillon de la pierre utilisée dans la construction du mur défensif a été amené au laboratoire, afin d'en extraire un certain nombre d'échantillons pour analyse, effectuer des essais mécaniques et étudier les résultats obtenus.

**V.3.3. Echantillonnage en laboratoire :**

Les différents types d'échantillons de pierre sont obtenus à l'aide d'une carotteuse permettant l'extraction de carottes cylindriques au diamètre souhaité. La seconde étape consiste, par la suite, à scier à la longueur désirée, les carottes à l'aide d'une scie double-face permettant l'obtention de deux faces parfaitement parallèles, et d'ainsi s'affranchir de problèmes de parallélisme des deux faces opposées qui pourrait survenir lors des essais mécaniques (cf. Figure 47). Enfin, tous les échantillons sont lavés à l'eau, puis étuvés à 55 °C pendant 72 heures jusqu'à l'obtention d'une masse constante.

Les échantillons ont été préparés sous forme de cylindres d'une longueur de 10 cm et d'un diamètre de  $\varnothing$  5 cm.



Figure 47 : Préparation des échantillons, [Les auteurs]

### **V.3. Méthodes de caractérisation expérimentale :**

#### **V.3.1. Analyse chimique de l'échantillon par des techniques d'observation minutieuses :**

L'examen microscopique, réalisé sur lames minces à l'aide d'un microscope polarisant, permet de déterminer précisément les différents éléments constitutifs de la lame, y compris les minéraux accessoires, la texture, les plans de déformation remarquables, les zones d'altération et les conditions de formation. Les photos présentes dans ce manuscrit sont obtenues à l'aide d'une caméra placée sur le microscope.

Les observations sont faites sur des fragments de pierre, préalablement séchés au four. Les échantillons sont placés à 55°C pendant 2 heures. Ainsi, l'eau de l'échantillon s'évapore. Le respect de ce protocole de préparation permet de ne pas altérer la microstructure initiale des échantillons à observer.

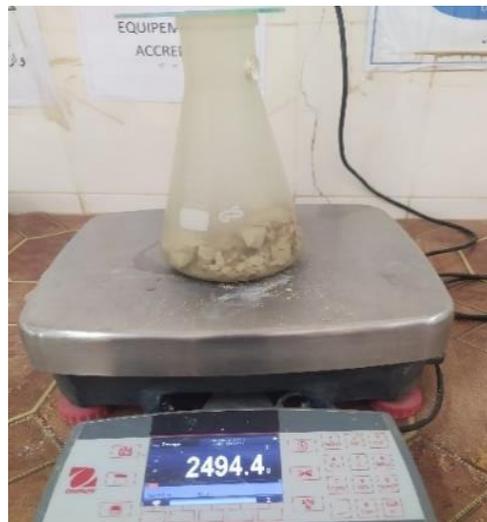
**V.3.2. Porosité totale accessible à l'eau  $N_T$ :**

La porosité d'une pierre représente le volume total de vides inclus dans cette pierre. Par définition, la porosité totale  $N_T$  est la porosité accessible à l'eau sous vide. Les mesures de ce paramètre sont réalisées selon la norme NF EN 1936 (AFNOR, 2007b). <sup>(28)</sup>

➤ **Mode opératoire :**

- Les échantillons de pierre sont séchés ( $m_{sèche}$ ) au four à 55 °C jusqu'à l'obtention d'une masse stable et/ou pendant 72 heures.
- Placer l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures pour saturer les pores avec de l'eau.
- Sortez l'échantillon de l'eau et essuyez-le avec un chiffon.
- Mesurer la nouvelle masse de l'échantillon, c'est-à-dire  $m_{saturée}$ .

Une pesée des échantillons tels qu'ils sont définis, & différents stades de l'essai, permet la détermination de la porosité totale accessible à l'eau  $N_T$ , (cf. équation 4). La réalisation de cet essai amène aussi à la détermination de la masse volumique des échantillons (cf. équation 5).



**Figure 48 : essais de la masse volumique absolue, [Les auteurs]**

$$N_T = \frac{m_{saturée} - m_{sèche}}{m_{saturée} - m_{hydrostatique}} \times 100 = \frac{V_{vides}}{V_{totale}} \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

Où :

$N_T$  : porosité totale accessible à l'eau en %;

$m_{saturée}$  : masse de l'échantillon saturé surface sèche, en g;

$m_{sèche}$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve, en g;

**m** hydrostatique : masse hydrostatique en g.

$$\rho = \frac{m_{s\grave{e}che}}{m_{satur\acute{e}e} - m_{hydrostatique}} \times \rho_{eau} \dots\dots\dots (5)$$

Où :

**ρ**: masse volumique réelle en **kg/m<sup>3</sup>**;

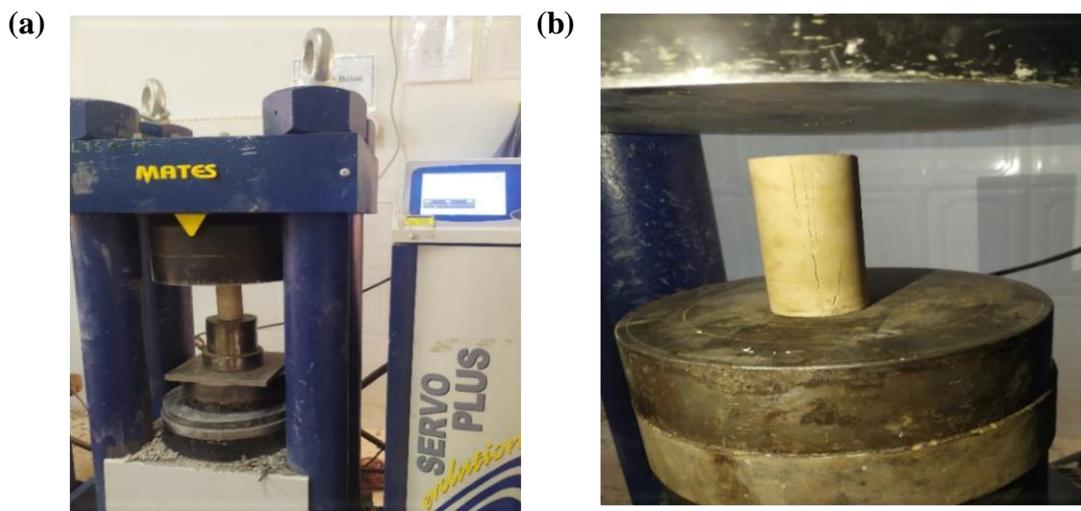
**ρ<sub>eau</sub>** : masse volumique de l'eau (= 1000 kg/m<sup>3</sup>).

**V.3.3. Résistance en compression Rc :**

Les mesures de résistance en compression Rc sont réalisées sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 5 x 10 cm, en adaptant la norme NF EN 1926. <sup>(29)</sup>

➤ **Mode opératoire :**

Les essais sont réalisés sur des échantillons secs, préalablement séchés à l'étuve à 55 °C jusqu'à masse constante et/ou pendant 72 heures. La valeur de la résistance en compression est une moyenne basée sur 3 essais pour les pierres à l'état sain.



**Figure 49 : (a) Essai de résistance en compression ; (b) Facies de rupture caractéristique d'un échantillon de calcaire, [Les auteurs]**

**V.3.4. Résistance en traction  $R_T$  :**

La résistance en traction  $R_T$  est déterminée en réalisant un essai de traction indirect par fendage, appelé communément l'essai brésilien (cf. figure 50).

➤ **Mode opératoire :**

Conformément à la norme NF P 94-422 qui préconise l'utilisation d'éprouvettes cylindriques avec un élanement compris entre 0,8 et 1,5, les essais sont réalisés sur des échantillons de dimensions 5 x 5 cm. Cette même norme indique que la vitesse de chargement appliquée doit être adaptée à la résistance de la pierre de telle sorte que la rupture de l'éprouvette ait lieu entre 2 minutes et 10 minutes après le début du chargement. La norme établie par l'ASTM <sup>(30)</sup> va dans ce sens en spécifiant une durée d'essai comprise entre 1 et 10 minutes, correspondant plus ou moins à une vitesse de chargement entre 65 et 0,35 MPA/s selon le type de pierre. Des essais préliminaires nous ont permis de définir une vitesse de chargement constante et égale à 1,27 KN /min.



**Figure 50 : Essai de résistance en traction par fendage: dispositif expérimental, développement de la fissuration sous chargement, [Les auteurs]**

La résistance en traction par fendage  $R_T$  est obtenue par la formule suivante :

$$R_T = \frac{2 F}{\pi L \phi} \dots\dots\dots (6)$$

Où :

**R<sub>T</sub>**: résistance en traction en **MPa**;

**F**: valeur de la force de compression appliquée à la rupture, en **N**;

**L**: longueur de l'éprouvette en **mm**;

**∅** : Diamètre de l'éprouvette en **mm**

### **V.3.5. Vitesse des ondes ultrasonores V<sub>p</sub> et module d'élasticité dynamique E<sub>dyn</sub> :**

La mesure de la vitesse de propagation des ondes primaires V<sub>p</sub>, correspondant aux ondes de compression, est une méthode de caractérisation non-destructive, qui renseigne sur la porosité de la pierre et son état de fissuration.

#### ➤ **Mode opératoire :**

Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un appareil de test ultrasonique, (cf. Figure 56), selon la norme NF EN 14579 (AFNOR, 2005) <sup>(31)</sup>. L'essai consiste à émettre un signal ultrasonore sous la forme d'une impulsion pour ensuite analyser sa propagation dans l'échantillon à caractériser. On mesure le temps de parcours de l'onde ultrasonore entre deux capteurs piézoélectriques, un émetteur et un récepteur, placés au contact de l'échantillon en vis-à-vis. Un produit couplant, de la vaseline, est appliquée aux surfaces capteurs- matériau afin d'améliorer le contact entre ces deux parties et d'ainsi s'assurer d'une bonne transmission des ondes.

Les mesures de vitesse des ondes P sont effectuées sur des échantillons parfaitement secs, préalablement séchés à l'étuve à 55 °C jusqu' u 'à masse constante et/ou pendant 72 heures.



**Figure 51 : Dispositif expérimental de la mesure de la vitesse des ondes P pour la détermination du module d'élasticité dynamique, [Les auteurs]**

Le module d'élasticité dynamique peut alors s'obtenir à l'aide de la relation suivante :

$$E_{dyn} = \frac{V_p^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \dots\dots\dots (7)$$

Où :

**E<sub>dyn</sub>** : module d'élasticité dynamique en **GPa**;

**V<sub>p</sub>**: vitesse des ondes P en **m.s<sup>-1</sup>**;

**ν** : coefficient de Poisson pour Calcaire **0.3** ;

**ρ**: Masse volumique en **kg.m<sup>-3</sup>**.

La vitesse de propagation du son dans la pierre est déterminée par la formule suivante :

$$V_p = \frac{L}{T} \dots\dots\dots (8)$$

Où :

**V<sub>p</sub>** : est la vitesse de propagation du son, en **m.s<sup>-1</sup>** ;

**L** : est la longueur de parcours, en **mm** ;

**T** : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en **μs**.

**V.3.6. Mesure de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval :**

Test des Micros-Deval Cette méthode est utilisé pour mesurer la capacité des granulats à résister à la corrosion sous l'effet du frottement.

Le test Micro-Deval, selon la norme EN 1097-1, consiste à placer un échantillon assemblé dans un cylindre rotatif en acier inoxydable avec des billes d'acier pesant 5 kg. Ensuite, le tambour est mis en rotation à une vitesse de 12 000 tours pendant une période de temps spécifiée.

Le test micro-Deval est utilisé pour évaluer la qualité des granulats utilisés dans la construction des routes et des pistes d'aéroport, cette méthode peut être utilisée pour comparer la qualité des granulats provenant de différentes sources ou pour évaluer la qualité des granulats après une exposition prolongée à l'eau ou des cycles de gel - dégel.

➤ **Mode opératoire :**

- Le matériau expérimental sélectionné est classé comme **(10-14 mm)** ;
- Le poids de l'échantillon testé est de **(500g)** ;
- Nous plaçons l'échantillon de granulats et de billes métalliques à l'intérieur de la machine d'essai ' D'après le **tableau (3)** ;
- Nous ajoutons **1,5 L** d'eau à l'échantillon testé ;
- On fait tourner le tambour à **12 000** tours pendant **2** heures ;
- On récupère les granulats obtenus après l'expérience dans un récipient en prenant soin de conserver la quantité obtenue ;
- Nous tamisons la quantité d'agrégats résultante sur un tamis **(1.6 mm)** ;
- Nous l'avons et séchons la quantité restante sur un tamis de (1.6 mm) jusqu'à obtenir un poids constant.

La résistance à l'usure **L<sub>A</sub>** est obtenue par la formule suivante :

$$L_A = 100 \times \left( \frac{M - m}{M} \right) \dots \dots \dots (9)$$

Où :

- L<sub>A</sub>** : coefficient Micro Dival (%) ;
- M** : Poids totale de mélange des proportions **g** ;
- m** : Le poids massique total du tamis est de **1,6 mm**



**Figure 52 : Essai La résistance à l'usure par essai Micro-Deval : dispositif expérimental, Articles de moins de 1,6 mm à l'aide d'un tamis, [Les auteurs]**

<i>classe de granulas</i>	<b>Poids des billes métalliques (g)</b>
<i>10/14 mm</i>	5000 ± 5
<i>6.3/10 mm</i>	4000 ± 5
<i>4/6.3 mm</i>	2000 ± 5
<i>4/8 mm</i>	2800 ± 5
<i>8/11.2 mm</i>	4400± 5
<i>11.2/16 mm</i>	5400 ± 5

**Tableau (3) : La charge des billes selon la classe de granules**

Source : dans (LTPS)

**V.3.7. Mesure de La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles :**

Le test de Los Angeles est une méthode standardisée utilisée pour évaluer la résistance à l'usure et aux chocs des agrégats, selon norme EN 1097-2. Il mesure la capacité des agrégats à résister à l'abrasion et aux chocs dus aux mouvements répétitifs et aux frottements dans les applications routières.

Le principe de l'essai de Los Angeles est de soumettre un échantillon d'agrégat à un processus de frottement et d'impact dans un cylindre en acier. L'échantillon est placé dans le tambour avec des billes d'acier, puis tourné de 500 tours à une vitesse spécifiée pendant une période de temps spécifiée, pendant la rotation, les billes d'acier entrent en contact avec l'agrégat, provoquant des chocs et de la corrosion, à la fin de l'essai, on retire du cylindre les granulats dont la taille est inférieure à 1,6 mm et on mesure le pourcentage de perte de masse.

➤ **Mode opératoire :**

- Nous prélevons une quantité de l'échantillon étudié, puis nous tamisons entre 10 et 14 mm ensuite, nous prenons **M= 5 kg** du poids restant de ces tamis.
- Nous plaçons l'échantillon et les billes d'acier à l'intérieur du cylindre, puis nous mettons l'appareil en marche pour effectuer 500 rotations.
- Nous l'avons l'échantillon à travers un tamis de **1.6 mm** pour garantir le passage des granulats en poudre à travers l'ouverture du tamis.
- L'échantillon est bien séché et son poids est calculé (**m**).

La résistance aux chocs **L<sub>ch</sub>** est obtenue par la formule suivante :

$$L_{ch} = 100 \times \left( \frac{M-m}{M} \right) \dots\dots\dots (10)$$

Où :

**L<sub>ch</sub>** : coefficient Los Angeles (%) ;

**M** : Poids totale de mélange des proportions **g** ;

**m** : Le poids massique total du tamis est de **1,6 mm**



**Figure 53 : Essai La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles, Tamis 10/14 avec les boules, [Les auteurs]**

### **V.3.8. Mesure Les propriétés mécaniques de la pierre à hautes températures :**

Les essais à hautes températures ont été effectués dans service du matériel (LTPS) qui dispose de deux fours électriques (cf. figure 54). Le four 1er possède une capacité de chauffe atteignant 300 °C, tandis que le second four, lui, ne permet pas de chauffage au-delà de 60 °C.

Le premier four a été modifié à une température de 110 °C, tandis que le deuxième four a été ajusté à une température de 55 °C. Puisque notre étude inclut l'effet de la température sur la pierre dans notre région, qui ne dépasse pas 60°C, nous avons concentré notre étude sur l'effet de température 55°C sur les échantillons.

Concernant la combustion du calcaire à une température de 900°C, nous avons demandé l'utilisation du four du Département de chimie, qui a une température maximale de 3000°C.

Dans le but de déterminer les lois d'évolution des propriétés du matériau en fonction de la température, il est impératif d'appliquer un chauffage à une vitesse suffisamment lente pour s'assurer que la température soit homogène au sein de l'échantillon et d'ainsi éviter de la fissuration en raison d'un gradient thermique trop élevé.

Ainsi différents paliers de température sont programmés à 55°C et 900°C. Cela permet de sélectionner en fonction de certaines températures les transformations thermochimiques des minéraux dans les pierres étudiées.

➤ **Mode opératoire :**

- Préparation d'un échantillon aux mêmes dimensions que ceux utilisés précédemment pour l'expérience, afin de garantir des conditions de test uniformes
- Soumission de l'échantillon à des cycles de chauffage à une température élevée (**55°C**)
- Appliquer une pression sur l'échantillon à une vitesse constante.
- Déterminer la résistance à la compression à partir de la charge maximale que l'échantillon peut supporter avant qu'il ne se brise ou ne se déforme.



**Figure 54 : Le four utilisé est 55 °C, l'échantillon est à l'intérieur du four, [Les auteurs]**

**V.3.9. Détermination de La résistance au gel :**

L'objectif principal de l'essai de gel-dégel, selon la norme NF EN 12371 <sup>(32)</sup>. C'est l'évaluation de la résistance de la pierre aux cycles répétés de gel-dégel. Ce test est le plus couramment utilisé pour étudier les effets du gel et du dégel sur les matériaux de construction exposés à diverses conditions météorologiques.

Prendre des mesures pour améliorer sa durabilité et sa ténacité dans les environnements exposés à ces cycles climatiques.

Le test réalisé est le test d'insertion de deux échantillons dans la chambre froide. La température à l'intérieur de la chambre est prise en dessous de 0°C (-10), et deux échantillons sont soumis à un milieu aqueux à l'intérieur de la chambre froide.

Selon la norme NF EN 12371, l'essai se poursuit jusqu'à ce qu'au moins deux échantillons soient considérés comme altérés selon l'un des critères suivants :

- **Examinassions visuelle :**

Les changements visibles sont rapportés à l'examen sur une échelle de progression de 0 à 5 (durcissement, fissuration, écaillage et fissuration). La limite de changement a été atteinte pour un score de 3.

- **Taille apparente :**

L'évolution volumique apparente est mesurée par pesée. La diminution du volume apparent doit être inférieure à 1 %. Cela reflète une perte matérielle.

- **coefficient de contrainte mécanique,**

La diminution du coefficient de contrainte mécanique est déterminée selon la norme NF EN 1926. Cette diminution du coefficient de contrainte mécanique traduit l'apparition d'une résistance inférieure à l'état sain.



**Figure 55 : La chambre froide utilisée est à - 10°C, les échantillons sont à l'intérieur de la chambre froide, [Les auteurs]**

**Conclusion :**

L'approche empirique adoptée dans cette note est présentée dans ce chapitre V. De plus, une brève présentation du site d'étude (Ksar El-Guerrara) et de l'étude de cas, et des pierres utilisées a montré leur origine ainsi que leur utilisation comme matériaux de construction ou de restauration dans les monuments historiques.

Différentes méthodes expérimentales ont été décrites et des protocoles de caractérisation ont été élaborés d'un point de vue pétrographique, mécanique et physique.

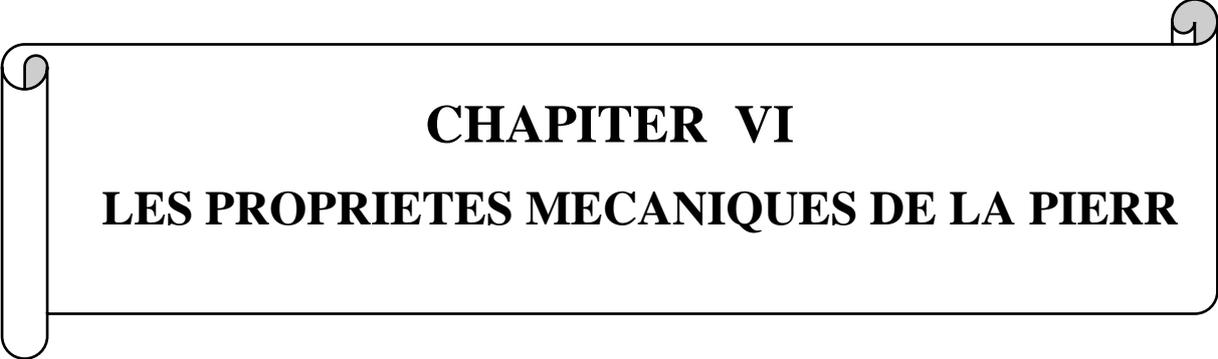
Ainsi, les minéraux de ces pierres sont déterminés par des observations à l'échelle microscopique à l'aide d'un microscope optique et d'un microscope électronique à balayage. La caractérisation microscopique de ces matériaux repose sur différents tests visant à étudier les propriétés du réseau poreux : Test de porosité totale à l'eau Sous vide.

La caractérisation mécanique est garantie d'une part, avec l'utilisation d'un piston électromécanique qui permet de déterminer les principales performances mécaniques : résistance à la compression et résistance à la traction. De plus, mesurez la vitesse de l'onde P se propageant à travers le matériau à l'aide d'un testeur à ultrasons.

Des analyses thermiques à chaud devraient permettre d'identifier les phénomènes thermo-chimiques clés affectant le comportement thermomécanique de ces pierres. Dans ce sens, des tests de dilatation jusqu'à 900°C sont effectués sur des échantillons de pierre.

Des essais mécaniques spécifiques sont effectués sur des échantillons de pierre chauffés à différentes températures (55°C). Cela devrait conduire à des indications fiables permettant de juger de la température maximale et minimale (-10°C) atteinte par la pierre.

Enfin, le chapitre VI présente le développement et la discussion de la méthodologie de sélection expérimentale pour des conditions thermiques extrêmes à des températures élevées et basses. De même, divers tests visant à caractériser le comportement au gel-dégel sont discutés.



**CHAPITER VI**  
**LES PROPRIETES MECANIKUES DE LA PIERR**

**Introduction :**

Ce chapitre VI présente les connaissances sur les propriétés physiques et mécaniques du calcaire étudié, en particulier la porosité ouverte, la densité, la résistance à la flexion et la résistance à la compression. La connaissance de ces propriétés est essentielle dans le domaine de la construction. Lire les résultats et les discussions sur les dommages à la pierre à haute température et les cycles de gel-dégel.

**VI.1. Les ordres de grandeurs des principales caractéristiques :**

Le tableau ci-dessous présente les principaux ordres de grandeur pour les essais les plus courants pour calcaire.

	<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosité (%)</b>	<b>Flexion (MPA)</b>	<b>Compression (MPA)</b>
	<b>NF EN 1936</b>	<b>NF EN 1936</b>	<b>NF EN 12372</b>	<b>NF EN 1926</b>
<b><i>Calcaire</i></b>	1300 - 2700	0,3 - 48	2 - 17	5 - 275

**Tableau (4) : Valeurs clés pour les tests de taille les plus courants pour le calcaire <sup>(33)</sup>**

Les pierres nature sont classées en trois catégories selon leur résistance à la compression (Rc) :

<b><i>La nature de pierre</i></b>	<b>Résistance à la compression `Rc` (MPA)</b>
<b><i>Les pierres tendres</i></b> <i>(utilisées principalement en maçonnerie et ouvrages de taille).</i>	Rc ≤ 10 MPA
<b><i>Les pierres fermes</i></b> <i>(utilisées principalement en revêtements de façades)</i>	10 < Rc ≤ 40 MPA
<b><i>Les pierres dures</i></b> <i>(utilisées principalement en revêtements de sols)</i>	Rc > 40 MPA

**Tableau (5) : Classification des pierres naturelles selon la résistance à la compression (Rc) <sup>(33)</sup>**

**VI.2. Les propriétés physiques et mécaniques de la pierre à l'état sain :**

**VI.2.1. Analyse chimique de l'échantillon :**

L'examen microscopique, qui est réalisé à l'œil nu et au microscope électronique sur l'échantillon brut, avec ajout de réactifs permet de déterminer de nombreuses propriétés et minéraux constitutifs de l'échantillon étudié (structure, couleur, texture), et se faire une idée préliminaire du type de pierre étudié (voir tableau 6).

<i>Echantillon</i>		<b>Pierre</b>
<i>Insolubles NFP 15-461</i>	Creuset+précipité	30.017
	Creuset vide	29.965
	Poids du résidu	0.052
	Insolubles %	5.2
<i>Sulfates BS 1337</i>	Creuset vide	25.039
<i>Carbonates NFP 15-461</i>	CaCO <sub>3</sub> %	89
	Couleur	blanc

**Tableau (6) : Résultats analyse chimique**

**Donc :**

- Le minéral de calcite (CaCO<sub>3</sub>) a été trouvé à 89 % et la couleur de l'échantillon est blanche, nous en concluons donc que la pierre étudiée est du calcaire.

**VI.2.2. Porosité totale N<sub>T</sub> et la masse volumique ρ :**

Les valeurs de porosité totale accessible à l'eau N<sub>T</sub> et de masse volumique apparente sèche ρ sont regroupées dans le Tableau (7).

<i>éprouvette</i>	<b>Porosité N<sub>T</sub> (%)</b>	<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<i>N°1</i>	1.1	2590
<i>N°2</i>	0.9	2630

**Tableau (7) : Les valeurs de porosité totale N<sub>T</sub> et la masse volumique apparente ρ**

➤ **Résultats :**

- L'observation de ces résultats montre que les échantillons étudiés présentent une masse volumique apparente ρ de **2610 kg/m<sup>3</sup>** et une porosité totale N<sub>T</sub> de **1 %**.

- Selon la norme de contrôle des matériaux **NF EN 1936** (tableau 4), et sur la base des résultats de porosité et des résultats de masse volumique apparente (tableau 7). Nous classons la pierre étudiée selon les critères les plus populaires qui en font un matériau de construction privilégié.

**VI.2.3. Résistance en compression  $R_c$  :**

Les valeurs de résistance à la compression présentées dans le tableau (8) correspondent à la moyenne de 3 essais réalisés sur calcaire, selon le protocole décrit au chapitre VI.

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de  $\varnothing 50 \times 100$  mm.

<i>épreuve</i>	<b>masse (g)</b>	<b>Force maximum (KN)</b>	<b>Contrainte maximum (MPA)</b>
<i>N°1</i>	430	105	53.5
<i>N°2</i>	422	98	49.9
<i>N°3</i>	407	92	46.8
<b><i>Valeur moyenne est</i></b>			<b>50</b>

**Tableau (8) : Valeurs moyennes de la résistance en compression des pierres saines**

➤ **Résultats**

- L'observation de ces résultats montre que les échantillons étudiés ont une résistance à la compression moyenne  **$R_c = 50$  MPA**
- Selon la norme **NF EN 1926** et classement des pierres naturelles selon leur résistance à la compression (tableau 5), et les résultats obtenus en (tableau 8). La résistance à la compression de l'échantillon étudié a été enregistrée comme bonne et durable principalement utilisée dans les revêtements de sol.

**VI.2.4. Résistance en traction  $R_T$  :**

Les valeurs moyennes de résistance à la traction, qui sont listées dans le Tableau (9), sont déterminées expérimentalement selon la méthode spécifiée en V.3.4. Cela dépend de la réalisation d'un test sur l'échantillon étudié.

Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de  $\varnothing 50 \times 50$  mm

<i>épreuve</i>	masse (g)	Force maximun (N)	Contrainte maximun (MPa)
<i>N°1</i>	295	20800	5.3
<i>N°2</i>	330	27100	7
<i>Valeur moyenne est</i>			6.1

Tableau (9) : Valeurs moyennes de la résistance en traction des pierres saines

➤ **Résultats :**

- L'observation de ces résultats montre que les échantillons étudiés ont une résistance à la traction moyenne **R<sub>T</sub> = 6.1 MPa**
- Selon la norme NF P 94-422, les résultats obtenus en La résistance à la traction de l'échantillon étudié ont été enregistrée comme bonne et forte, et le résultat obtenu a été limité à la plage de valeurs précédemment rapportées.

**VI.2.5. Vitesse des ondes ultrasonores V<sub>p</sub> et module d'élasticité dynamique**

**E<sub>dyn</sub> :**

Les valeurs de la vitesse des ondes P et les valeurs estimées du module d'élasticité dynamique, qui ont été déterminées par la relation décrite en V.3.5, sont présentées dans le tableau (10). Cette technologie est non destructive.

$$T=21.6 \cdot 10^{-6} \mu s ; \nu = 0.3 ; \rho = 2610 \text{ kg/m}^3$$

<i>épreuve</i>	longueur (mm)	Vitesse (m/s)	E <sub>dyn</sub> (GPa)
<i>N°1</i>	980	4460	38.5

Tableau 10 : Valeurs de vitesse d'onde P et module d'élasticité dynamique des pierres saines

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

Tableau 11 : Classification de la pierre d'après la vitesse du son

➤ **Résultats :**

- L'observation de ces résultats montre que les échantillons étudiés ont un module d'élasticité de  $E_{dyn} = 38.5 \text{ GPa}$  et une vitesse des ondes ultrasonores  $V_p = 4460 \text{ m/s}$
- Selon les résultats des tests effectués sur un échantillon de pierre à l'aide d'ultrasons, comparés aux normes de classification de la pierre d'après la vitesse du son (Tableau 11) on peut conclure que la pierre est de bonne qualité. Ainsi, la vitesse élevée des ultrasons indique que la résistance mécanique de l'échantillon est adéquate et toujours valide dans la construction.

**VI.2.6. Mesure de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval :**

Les valeurs moyennes de résistance à l'usure données dans le tableau (12) sont déterminées expérimentalement selon la méthode précisée en V.3.6 et cela dépend de la réalisation de l'essai sur l'échantillon étudié selon l'essai essai Micro-Deval.

<i>granulaire</i>	Tamis Intermédiaire	proportion (%)	M(g)	m(g)	$L_A = 100 \times (\frac{M-m}{M})$
<i>10/14</i>	10/12.5	60%	300	<b>390</b>	<b>22 %</b>
	12.5/14	40%	200		

**Tableau (12) : Valeurs de La résistance à l'usure par essai Micro-Deval des pierres saines**

<b>VALEURS REPERES</b>	
<b>MICRO-DIVAL EN PRESENCE D'EAU (%)</b>	<b>APPRECIATION</b>
<b>&lt;10</b>	Trés bon à bon
<b>10 à 20</b>	Bon à moyen
<b>20 à 35</b>	Moyen à faible
<b>&gt;35</b>	Médiocre

**Tableau (13) : Indice de qualité global en MICRO-DEVAL**

➤ **Résultats :**

- Le pourcentage du test Micro-Deval  $L_A=22\%$ , indique la qualité des granulats étudiés et leur résistance à l'usure et à l'abrasion, afin de déterminer leur aptitude à être utilisés dans les opérations de construction.
- En comparant les résultats de l'expérience (tableau 12) avec les données du tableau (tableau 13), nous classons la qualité des agrégats sous expérience comme de qualité moyenne à faible, avec une résistance moyenne à l'usure et au frottement.

**VI.2.7. Mesure de La résistance aux chocs et frottements par méthode de Los Angeles :**

Les valeurs de résistance aux chocs et aux frottements présentées dans le tableau (14) ont été déterminées expérimentalement selon la méthode précisée en V.3.7 et cela dépend de la performance du test sur l'échantillon étudié selon le test de Los Angeles.\*

<i>granulaire</i>	<b>Tamis Intermédiaire</b>	<b>proportion (%)</b>	<b>M(g)</b>	<b>m(g)</b>	$L_{ch}=100 \times \left( \frac{M-m}{M} \right)$
<i>10/14</i>	10/12.5	60%	3000	<b>3785.5</b>	<b>24 %</b>
	12.5/14	40%	2000		

**Tableau (14) : Valeurs de La résistance à l'usure par essai Los Angeles des pierres saines**

➤ **Résultats :**

- Le pourcentage de test de Los Angeles  $L_{ch}= 24 \%$  indique la qualité des granulats étudiés et leur résistance aux chocs et aux frottements.
- selon norme EN 1097-2, et selon les résultats de l'étude (Tableau 14), une bonne résistance a été enregistrée pour les granulats étudiés, lesquels résistent aux chocs et aux forces mécaniques externes.
- L'essai Los Angeles est défini par la norme EN 1097-2 :  
Plus le coefficient Los Angeles est faible, plus le numérateur de la formule ci-dessus est faible, ce qui signifie qu'il y a une faible différence entre la masse initiale de l'échantillon et la masse résiduelle, après lavage et pesage. L'échantillon

sous l'action des 11 boulets n'a donc subi qu'une faible usure, il est donc très résistant ; Calcaires :  $15 < L_{ch}=24 \% < 100$  (très variable).

**VI.3. Les propriétés mécaniques de la pierre à hautes températures :**

La pierre est un matériau très résistant à la compression et à la tension, mais sa résistance mécanique peut être affectée à des températures élevées.

Cette sous-section présente de manière générale le comportement à haute température des pierres de construction considérées. Le but de cette section est de décrire le comportement à chaud des matériaux et d'évaluer ainsi les transformations mécaniques (test de résistance à la compression) lorsque ces pierres sont exposées à des températures allant jusqu'à 55 et 900 °C

**VI.3.1. Résultats de La résistance à la compression Rc :**

Lorsque la pierre a été exposée à des températures élevées pendant une période déterminée selon notre étude expérimentale, et en réalisant un test de résistance à la compression sur un échantillon de pierre extrait du four à une température de 55 degrés pendant une période de 10 jours, nous avons finalement obtenu le résultats enregistrés dans le tableau (15) :

L'essai a été réalisé sur une éprouvette cylindrique de Ø50 x 100 mm

<i>éprouvette</i>	<b>masse (g)</b>	<b>Force maximun (KN)</b>	<b>Contrainte maximun (MPA)</b>
<i>N°1</i>	415	79.5	40.5

**Tableau (15) : La valeur de la résistance à la compression des pierres à une température de 55°C**

➤ **Résultats :**

- Sur la base des données calculées pour évaluer la résistance de la pierre à la température spécifiée (55 °C) pour notre étude (tableau 15), en comparant les résultats précédemment étudiés sur la résistance à la compression de la pierre à l'état sain, il a été constaté que la résistance à la compression a un léger effet, nous concluons donc que calcaire Il résiste à une chaleur modérée et convient à une utilisation dans la construction dans les zones désertiques.

- Il est également important de noter que la résistance d'une pierre aux hautes températures peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que le type de pierre, sa porosité, sa densité et sa structure cristalline.

**+ À une température de 900°C :**

- Afin d'obtenir l'effet de la température 900°C sur le calcaire, CaCO<sub>3</sub>, comme mentionné précédemment, qui se transforme en calcite Ca(OH)<sub>2</sub>, l'information a été vérifiée. Il a également montré un changement de couleur et une perte importante de la résistance mécanique de la pierre (elle se brise manuellement), et la présence d'une réaction chimique et de corrosion de l'échantillon lorsqu'il est mélangé avec de l'eau (voir figure 56).



**Figure 56 : Obtention de chaux après une température de 900°C degrés, [Les auteurs]**

**VI.3.2. Perte de masse :**

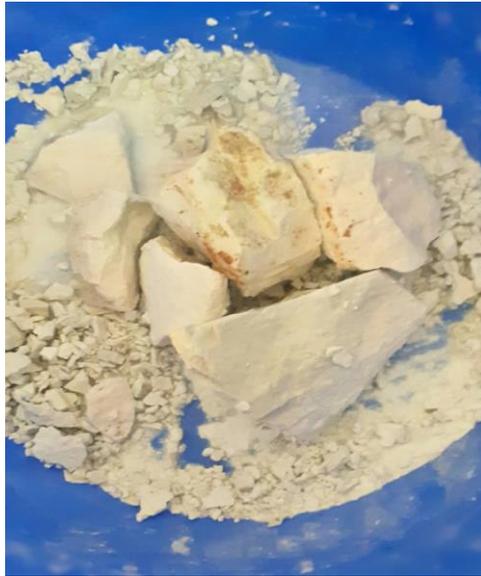
Outre la comparaison entre la masse d'un échantillon sain et la masse d'un échantillon exposé à la chaleur, notamment à une température de 900, nous avons enregistré les résultats suivants :

	<b>Température ambiante</b>	<b>température à 55°C</b>	<b>température à 900°C</b>
<i>La masse (g)</i>	1081	1065	738.2

**Tableau (16) : La valeur de la perte de masse à différentes températures**

**➤ Résultats :**

- Une très légère perte de masse de pierre à 55°C, vraisemblablement due à la dissolution des impuretés à la surface de l'échantillon et au séchage de l'échantillon à partir de la quantité d'eau qu'il contient.
- Une perte significative de masse de pierre de 30% à 900°C, probablement due à la rupture des liaisons métalliques et à la libération de CO<sub>2</sub> avec la décomposition de la calcite.



**Figure 57: Fragmentation et perte de masse à 900°C, [Les auteurs]**

**VI.4. Les propriétés mécaniques de la pierre au gel-dégel :**

La pierre peut subir des dommages importants lorsqu'elle est soumise au gel et au dégel. C'est un phénomène qui se produit lorsque l'eau pénètre dans les pores de la pierre et se dilate lorsqu'elle gèle, provoquant la compression de la pierre. Une telle pression peut entraîner des fissures et des déformations.

Les propriétés mécaniques de la pierre de congélation et de décongélation peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment la porosité de la pierre, sa densité, sa perméabilité et sa résistance à la pression.

**VI.4.1. Résultats de La résistance à la compression Rc:**

L'essai a été réalisé sur une éprouvette cylindrique de Ø50 x 100 mm

<i>éprouvette</i>	masse (g)		Température (°C)	Force maximun (KN)	Contrainte maximun (MPA)
	avant	après			
<i>N°1</i>	427	420	-10	80	40.74
<i>N°2</i>	415	411	10	75.4	38.4

**Tableau (17) : La valeur de résultats de La résistance à la compression après gel**

➤ **Résultats :**

En comparant les résultats décrits dans (Tableau 17) pour évaluer la résistance de la pierre aux cycles de gel et les résultats précédemment étudiés sur la résistance à la compression

de la pierre dans un état sain (Tableau 8) nous a constaté que la résistance à la compression avait des changements, parmi les raisons de ces changements sont les suivants :

- L'enregistrement d'une diminution du développement de la taille apparente par le poids post-gel reflète la perte de matière.
- Diminution du coefficient de contrainte mécanique Cette diminution traduit l'apparition d'une résistance inférieure à un état sain.
- Le calcaire représente un développement qui combine une diminution et une augmentation de la résistance à la compression. En général, la perte de résistance à la compression dépasse rarement 20 % pour l'état sain, quel que soit l'échantillon ou la basse température.

**VI.4.2. Surveiller le changement d'état pendant les cycles de gel-dégel :**

Lors des cycles de gel-dégel, certaines pierres à un certain degré de saturation peuvent présenter une altération de matière sans que des dommages macroscopiques (fissuration, effritement, perte de matière) ne soient observables.

Au cours de cette campagne expérimentale (Fait à la maison), et après 30 cycles de gel/dégel, le calcaire a présenté une forme de décoloration facilement reconnaissable à l'œil nu.

La figure 58, affiche l'évolution de l'altération de la pierre calcaire, au cours des 30 premiers cycles de gel-dégel (chaque cycle 8 heures). On peut observer au vu de ces images, l'influence du degré de saturation en eau de la pierre sur le développement accéléré et intense de l'endommagement de échantillon.



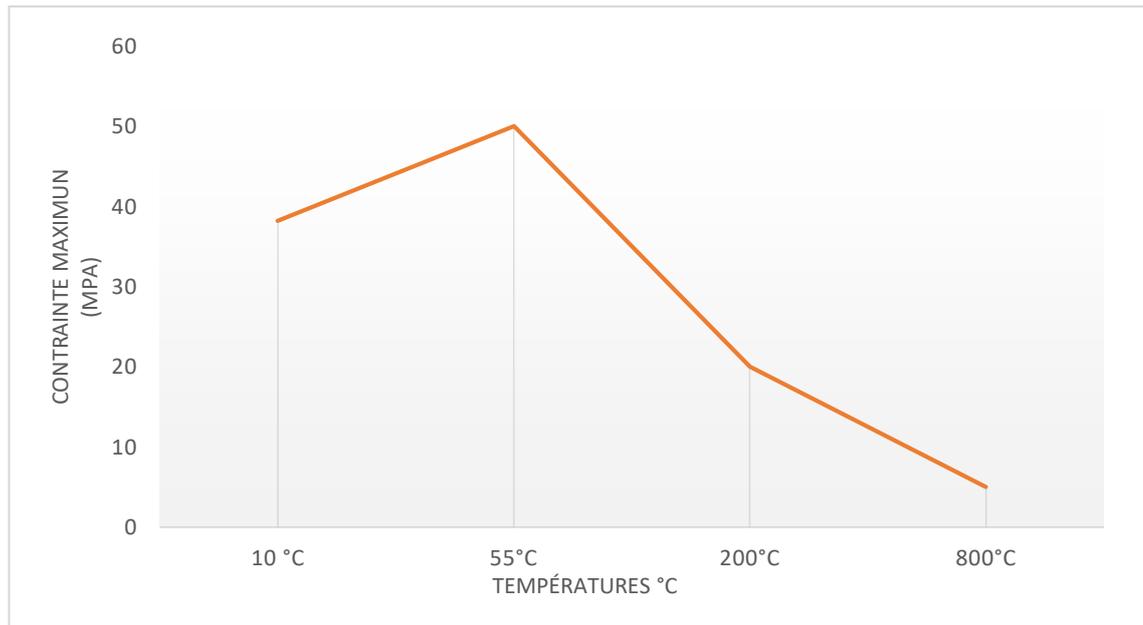
**Figure 58 : (a) L'échantillon est dans un milieu aqueux à l'intérieur du refroidisseur, (b) Evolution de l'état visuel d'endommagement des échantillons après 30 cycles de gel-dégel, [Les auteurs]**

➤ **Résultats :**

- Elle dilate l'eau contenue dans les pores de la pierre, ce qui entraîne des contraintes sur la structure interne. Ces contraintes peuvent endommager les liaisons entre les grains de pierre et entraîner une perte de résistance.
- L'eau qui gèle à l'intérieur des pores se dilate et appuie sur les parois, ce qui peut entraîner des fissures à la surface. Ces fissures affaiblissent la pierre et peuvent affecter la résistance à la compression.

Ainsi, nous concluons que l'étude de la porosité a un rôle important dans la résistance de la pierre au gel-dégel

Dans ses travaux de thèse, [Walbert, 2015] indique que les mesures de la résistance en compression peuvent être plus ou moins sensibles à l'endommagement de la microstructure selon la direction des microfissures ou leurs répartitions spatiales. Ainsi, si l'endommagement est superficiel et que les fissures sont essentiellement situées en surface, alors la résistance en compression est peu impactée par la présence de ces fissures. <sup>(34)</sup>



**Figure 59 : Évaluer l'effet de différentes températures sur la résistance à la compression du calcaire**

### **Conclusion :**

À la fin de ce chapitre, nous avons déterminé les propriétés mécaniques de la pierre dans le bâtiment patrimonial et étudié ses effets dans des conditions naturelles, y compris les changements de température et le phénomène de gel-dégel. Une exposition prolongée à ces facteurs peut entraîner une détérioration et des dommages à la pierre. Par conséquent, il est nécessaire pour toute personne intéressée par le domaine de la construction patrimoniale de déterminer les technologies nécessaires pour surveiller et protéger la pierre de tels changements sur la base des résultats de cette étude. Les mesures de protection appropriées pour assurer la durabilité de la pierre peuvent inclure :

- L'utilisation de revêtements protecteurs : l'application de revêtements protecteurs peut aider à empêcher la pénétration de l'eau à la surface de la pierre et à prévenir les températures élevées.
- Utilisation de traitements imperméables : l'application de traitements imperméables sur la pierre peut aider à réduire l'absorption d'eau et à la protéger des dommages causés par les cycles de gel-dégel.

En mettant en œuvre de telles mesures de protection, nous pouvons assurer la longévité et la préservation de la pierre dans les bâtiments patrimoniaux.

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

---

Les résultats suivants ont été obtenus à partir des études réalisées avec les échantillons qui ont différentes caractéristiques de calcaire sous l'influence de la température élevée et cycle gel-dégel pour déterminer les changements des propriétés mécaniques en fonction de la température des pierres de construction naturelles.

- L'augmentation de la température entraîne une diminution du poids de la densité apparente causée. En analysant la densité de la pierre naturelle, l'influence des changements de température dans la même direction a été déterminée.
- L'augmentation du taux de plénitude des pierres naturelles par diminution de la température a été déterminée. L'une des caractéristiques les plus importantes décrivant la détérioration des propriétés physico-mécaniques des roches est la diminution du taux d'occupation.
- Il est déterminé que l'augmentation de la température augmente la porosité des pierres naturelles.
- Lorsque la température augmente, les valeurs de porosité apparente augmentent également. Cette situation est causée par des fissures capillaires dues à la chaleur, aux matériaux de la structure, etc.
- L'effet de la température sur la dureté est limité. Il est déterminé qu'il n'y a pas de changement énorme sur la dureté des échantillons.
- Une augmentation de la quantité d'eau absorbée par une augmentation de la température peut entraîner des démolitions structurelles. Par conséquent, des précautions de sécurité doivent être prises en cas d'exposition à l'eau lorsqu'un incendie est détecté, surtout si le bâtiment est en pierre calcaire.
- Il est déterminé que l'augmentation de la température produit des fissures capillaires et les fissures capillaires provoquent une augmentation du coefficient d'absorption d'eau capillaire sur les pierres naturelles.
- Les changements de température des pierres naturelles affectent les valeurs de résistance à la compression. En particulier, les valeurs de résistance des échantillons à 800 °C et plus sont relativement faibles. Par conséquent, l'utilisation des pierres naturelles comme support dans les bâtiments n'est pas pratique, étant donné que le bâtiment pourrait éventuellement atteindre ces températures.

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

---

- La résistance à la traction des échantillons diminue avec l'augmentation de la température. Pour les calcaires, cela s'observe sous une forme irrégulière à différentes températures avec diminution/augmentation.
- Les zones d'utilisation des pierres naturelles exposées au feu ou à des températures élevées sont très importantes selon le niveau de température.
- Des températures atteignant 600–800 °C causent des dommages destructeurs aux pierres naturelles. Par conséquent, une grande quantité d'abrasion peut endommager la structure du bâtiment et augmenter les coûts de renouvellement.
- À la suite du test de congélation et de décongélation, une perte/changement de masse pour presque tous les échantillons.
- Utilisation de traitements imperméables : l'application de traitements imperméables sur la pierre peut aider à réduire l'absorption d'eau et à la protéger des dommages causés par les cycles de gel-dégel.

### **Rappel du contexte et des objectifs :**

Pendant des siècles, les pierres naturelles ont été largement utilisées comme matériaux de construction dans le patrimoine bâti. Aujourd'hui, la pierre est toujours d'actualité et son utilisation principale est la restauration et le remplacement des pierres altérées. De plus, l'exposition des bâtiments historiques aux dommages causés par les températures élevées met en évidence le problème de la préservation et de la préservation durable du patrimoine urbain face aux dommages environnementaux et aux accidents graves. Ainsi, afin de contribuer à l'amélioration des connaissances sur l'altération des pierres dans leur environnement, il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur les différents mécanismes de dégradation associés aux contraintes hydrothermales et mécaniques extrêmes.

### **La démarche expérimentale :**

Cette étude s'articule autour du calcaire représenté comme étude de cas, ces pierres étaient largement utilisées dans les bâtiments patrimoniaux du Ksar El-Guerrara et d'ailleurs.

La caractérisation de la roche a mis en évidence la pierre étudiée à travers sa composition minérale : la présence de différents minéraux comme la calcite, la dolomite et le quartz en proportions variables. De plus, une grande richesse vis-à-vis des éléments constitutifs des pierres a été établie présence de grains de natures diverses allant du micrométrique au plurimillimétrique.

L'étude de la porosité de la pierre étudiée a déterminé qu'elle varie de 0,9% à 1,1%. La porosité est répartie différemment selon la nature de la pierre.

Les différents tests mécaniques réalisés, aussi bien destructifs que non destructifs, ont révélé les principales propriétés permettant d'évaluer les performances mécaniques de ces pierres à l'état sain : résistance à la compression, résistance à la traction, résistance aux chocs et au frottement. Ainsi que statique et dynamique. Module d'élasticité. Les matériaux étudiés ont des valeurs de résistance à la compression allant d'environ 35 MPA à environ 50 MPA, ainsi que des valeurs de résistance à la traction qui oscillent entre 4 et 7 MPA.

### **Comportement de la pierre dans des conditions de température élevée et des cycles de gel/dégel :**

Des effets thermiques élevés effectués sur des parties des pierres qui ont été chauffées à différents niveaux de températures ont mis en évidence la modification minérale de la pierre

## CONCLUSION GENERALE

---

étudiée. La calcite, principal minéral du calcaire, disparaît à partir de 900 °C, où des traces de chaux (produit de la décarbonatation) et de portlandite (issue de l'hydratation de la chaux) peuvent être identifiées.

Le phénomène de déformation thermique différentielle génère une augmentation locale de la contrainte. Ainsi, la taille des grains s'impose comme un paramètre défavorable dans le cas où ils sont de grandes dimensions, conduisant à des déformations absolues plus importantes. Soumis à des déformations thermiques lors du chauffage, le calcaire présente des pertes mécaniques très importantes à partir de 900°C, alors qu'il présente une stabilité à 55°C.

Un accent particulier a été mis sur le cas de la dégradation résiduelle du calcaire, lors d'un cycle thermique à 900 °C. Une étude statistique de la fragmentation totale de l'échantillon avec un manque de masse en a résulté, avec une bonne corrélation entre l'établissement du module de densité d'écrasement et la sensibilité thermique.

Dans le but de reproduire les effets répétés des cycles de gel-dégel. La gamme de température lors de ces tests était comprise entre **10°C** et **-10°C**. Différents états de saturation ont été approchés afin d'évaluer l'effet de ce paramètre environnemental sur la dégradation de la pierre par le phénomène de gel-dégel. La modification des propriétés mécaniques au cours des différentes étapes des cycles de gel-dégel a été évaluée afin d'estimer la progression des dommages.

Tout d'abord, une attention particulière a été portée au suivi de l'état d'évolution apparent des échantillons de pierre après différents niveaux de cycles de gel-dégel. Cependant, à saturation totale sous vide ( $S_a = 100\%$ ), le calcaire présentait des signes nets de dégradation (fissures).

Des essais mécaniques ont été effectués afin de déterminer l'effet des cycles de gel et de dégel sur le développement de la résistance à la compression. Les résultats obtenus montrent que l'endommagement résultant dépend de la température étudiée. Dans certains cas, l'affaiblissement de la résistance en compression est directement lié au nombre de cycles de gel-dégel, tandis que dans d'autres cas, d'autres facteurs tels que la teneur en eau peuvent également jouer un rôle important.

- Étude des propriétés mécaniques de la pierre : Il serait important de comprendre les propriétés mécaniques spécifiques de la pierre utilisée dans les constructions patrimoniales. Cela pourrait inclure des recherches sur la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la traction, la porosité, la perméabilité, la résistance aux cycles de gel-dégel, etc. Ces caractéristiques mécaniques influencent directement le comportement de la pierre dans les structures.
- Analyse des mécanismes de dégradation : Il serait essentiel de comprendre les mécanismes de dégradation affectant la pierre dans les constructions patrimoniales. Cela pourrait inclure l'étude des processus tels que l'altération chimique, la désintégration mécanique, la cristallisation de sels. L'identification et la compréhension des mécanismes de dégradation aideraient à développer des stratégies de préservation appropriées.
- Évaluation des techniques de réparation et de renforcement : Il serait intéressant d'examiner les différentes techniques utilisées pour réparer et renforcer les structures en pierre dans le contexte du patrimoine. Cela pourrait inclure l'étude des techniques traditionnelles ainsi que des développements plus récents. L'évaluation de l'efficacité de ces techniques dans le maintien de l'intégrité structurelle seraient importante.
- Étude de cas historique et études de cas: il sera utile d'étudier des cas historiques spécifiques de constructions patrimoniales en pierre. L'analyse de ces cas peut fournir des informations précieuses sur les technologies de construction, les matériaux utilisés et les problèmes rencontrés. De plus, des études de cas contemporaines sur des interventions de conservation réussies peuvent être menées pour comprendre les bonnes pratiques actuelles.
- Modélisation numérique et simulations : Les méthodes de modélisation numérique, telles que les éléments finis, peuvent être utilisées pour simuler et prédire le comportement mécanique de la pierre dans les constructions patrimoniales. Cette perspective de recherche consisterait à développer des modèles numériques représentant les propriétés et les conditions réelles de la pierre, afin d'étudier son comportement sous différentes charges et conditions environnementales.

## **PERSPECTIVES DE RECHERCHE**

---

- Étude des méthodes de restauration et de conservation : Cette perspective de recherche se penche sur les techniques de restauration et de conservation utilisées pour préserver les constructions patrimoniales en pierre. Il pourrait être intéressant d'examiner comment ces méthodes affectent le comportement mécanique de la pierre, en particulier en termes de résistance structurelle, de stabilité et de durabilité à long terme.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- (1) Alamyimages.fr
- (2) Construire en pierre, OPVM.
- (3) Types de toiture dans les bâtiments traditionnels (OPVM)
- (4) Robert & Colina, Translation Quality Evaluation Empirical Evidence for a Functionalist Approach, 2008.
- (5) Comportement à haute température des granulats naturels siliceux et calcaires et leur influence sur celui du béton. Razafinjato, 2013, p 8
- (6) Hajpál & Török, Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat 2004, p 315
- (7) W.S. González-Gómez, Thermal effects on the physical properties of limestones 2015, p 184
- (8) W.H. Somerton, Thermal Properties And Temperature-Related Behavior Of Rock/Fluid Systems 1992
- (9) Homand-Etienne, Comportement Mécanique Des Roches En Fonction De La Temperature 1986, p 60
- (10) Martin Vigroux, Influence de la microstructure et de la minéralogie sur l'endommagement mécanique des pierres de construction, p 20
- (11) Hajpál & Török, Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat 2004, p 317.
- (12) Fredrich, J. T., and T. F. Wong, 1986, Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks, J. Geophys ,p 91.
- (13) Homand-Etienne,(1989)." Thermally induced microcracking in granites:characterization and analysis", p125
- (14) Nasser, M. H. B, Common evolution of mechanical and transport properties in thermally cracked Westerly granite at elevated hydrostatic pressure, p 166.
- (15) Houpert & Homand-Etienne, Influence Of Temperature On The Mechanical Behaviour Of Rocks 1979.
- (16) Homand-Etienne, Comportement mécanique des roches en fonction de la température 1986.
- (17) A. Ozguven, Y. Ozcelik, Engineering Geology 2014, p 136
- (18) Martin Vigroux, Influence de la microstructure et de la minéralogie sur l'endommagement mécanique des pierres de construction, p 38-39
- (19) A. Ozguven, Y. Ozcelik, Engineering Geology 2014

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (20) J. Ruedrich , Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: a laboratory long-term study, (2001).
- (21) Céline Thomachot, Modifications de propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts, (2002).
- (22) J. Ruedrich , Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: a laboratory long-term study, (2001). P 20
- (23) Céline Thomachot, Modifications de propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts, (2002).
- (24) Marion Bost, Altération par le gel des massifs rocheux : Etude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures, (2008),p 103.
- (25) د.أبوبكر صالح، القرارة من التأسيس إلى دخول الاستعمار الفرنسي 1631-1882م، ج 1، ص 41
- (26) الشيخ طلاي إبراهيم, ميزاب بلد الكفاح, م, س, ص 21.
- (27) Construire en pierre, OPVM, p 24.
- (28) AFNOR. 2007b. "NF EN 1936, Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouverte et totale.
- (29) AFNOR. 2007a. "NF EN 1926, Méthodes d'essai des pierres naturelles - Détermination de la résistance en compression uni axiale,
- (30) ASTM. 1995. "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens."
- (31) AFNOR. 2005, "NF EN 14579, Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la vitesse et propagation du son.
- (32) AFNOR. 2010. "NF EN 12371, Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance au gel.
- (33) Guide pratique de la pierre naturelle – CTMNC
- (34) Charlotte Walbert, Endommagement par le gel de pierres calcaires utilisées dans le patrimoine bâti, étude du comportement hydromécanique, 2015