

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Frères Mentouri Constantine 1



Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du territoire
Département des Sciences Géologiques

THÈSE

PRESENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT 3^{ème}
CYCLE (LMD)

FILIERE : GEOLOGIE

OPTION : Géo-ressources et environnement

THÈME :

Dégradation et origine des matériaux de construction des
monuments historiques : cas de la muraille et Basilique de
Tébessa, Algérie.

Par :

NASRI Fatah

Devant le jury :

Président	Pr. Marmi Ramdane	Université Frères Mentouri Constantine 1
Directeur de thèse	Pr. Boumezbeur Abderrahmane	Université Larbi Tebessi Tébessa
Examineur	Pr. Bouabsa Lakhdar	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Pr. Bourefis Ahcène	Université Frères Mentouri Constantine 1
Examineur	Dr. Chellat Smaine	Université Frères Mentouri Constantine 1

Année universitaire : 2018/2019

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont soutenue, encouragé
durant tout mon parcours d'étude. Ils ne seront jamais assez
remerciés.*

*Aussi je dédie ce travail à ma chère petite sœur Fanida et mes
chères frère Fares et Fayçel qui m'ont soutenue, encourager et
conseillée durant tout mon parcours et qui ne m'ont jamais refusée
rien.*

Aussi la dédicaces va de font de mon cœur à mes grands-parents.

*A tous mes amis et amies Fahem, Baby, Sofiane, Jacob, Faouzi,
Wahiba, Hassiba, Chavha...etc.*

A tous mes camarades doctorants et doctorantes.

Remerciement

Que tous ceux qui m'ont aidé à mener ce travail à terme trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de thèse Abderrahmane Boumezbeur de m'avoir proposé le sujet de thèse et qui m'a encadré tout au long. Je lui suis également reconnaissant pour m'avoir fait confiance, pour son soutien et qui a su me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes travaux, tout en y gardant un œil critique et avisé.

Son aide, lors de la rédaction de cette thèse, a été particulièrement précieuse, ses propositions et corrections ont aidé à améliorer significativement la qualité de ce manuscrit qui a permis cette délivrance formidable : la soutenance. Je salue aussi ses qualités pédagogiques et scientifiques, j'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse toute ma gratitude.

Je remercie également Monsieur Marmi Ramdane pour avoir accepté de présider le jury. Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail : Monsieur Bourefis Ahcene (Université Frères Mentouri Constantine 1), Chellat Smaine (Université Frères Mentouri Constantine 1) et Monsieur Bouabsa Lakhdar (Université Badji Mokhtar Annaba) pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être les examinateurs de ma thèse.

J'adresse également mes remerciements à Mr David Benavente (Université d'Alicante, laboratoire de pétrologie appliqué, Espagne) pour avoir été présent tout au long de ce travail et pour son soutien et aussi pour son accueil dans son laboratoire. Un grand merci à l'équipe de pétrologie appliqué de l'université d'Alicante qui m'ont bien accueillie en l'occurrence Madame Felicia, Monsieur Jaime et Madame Garcia-Del-cura. Encore une fois, j'adresse aussi mes grands remerciements à Mr Bourfis Ahcene, Mr Marmi Ramdane pour leur présence durant toute la thèse par leur rigueur scientifique ainsi que leur critique durant toute la réalisation de ce travail. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à Mademoiselle M^{elle} Ait Abdelouahab Djouza pour sa rigueur scientifique, ses critiques constructives, ainsi que sa disponibilité. Je tiens également à remercier Martha Cary Eppes (University of North Carolina at Charlotte, USA), Andrea May (University of Muenster, Germany) et Djabri Rabah (Université Abderrahmane Mira Béjaia) pour leurs suggestions et critique lors de la rédaction de l'article.

Je remercie aussi l'office de la gestion et de l'exploitation des sites historiques de Tébessa (OGBC) pour leur aide et soutien ainsi que leur contribution et aussi un merci pour le ministère de la culture.

Aussi, je remercie Mr Zkour pour m'avoir accordé l'utilisation de la carotteuse.

Je remercie aussi Mr Boularak Moussa, Laziz Ouidad pour leur soutien et critiques.

Aussi un grand merci au directeur de labo de génie civil de Tébessa pour l'accès et l'utilisation de matériel. Un grand merci au chef de département de géologie de l'université d'Annaba et de l'ingénieur de labo des lames minces.

Je remercie aussi le chef de département de génie civil de l'université Frères Mentouri Constantine 1.

Tables des matières

Dédicaces	I
Remerciements	II
Tables des matières	III
Listes des figures	VI
Listes des tableaux	VIII
Listes des planches	IX
Listes des abréviations	X
Résumé	XI
Abstract	XII
Résumé en arabe	XIII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Synthèses bibliographiques sur l'altération et la dégradation des pierres de taille	5
1. Introduction	6
2. Notion d'altération et de dégradation	6
3. Formes d'altération	7
4. Différents types d'altération	7
4.1. Altération physique	8
4.2. Altération chimique	11
4.3. Altération biologique	12
5. Les facteurs d'altération	12
5.1. Les facteurs internes	12
5.2. Les facteurs externes	14
6. Conclusion	17
Chapitre 2 : Contexte géographique et aperçu générale sur la Muraille et la Basilique de Tébessa	19
1. Introduction	20
2. Situation géographique et administrative	20
2.1. Climat	21
2.2. Végétation	22
3. Description des deux monuments	22
4. Donnée de l'état actuel des monuments	23
4.1. Orientation des façades	23
4.2. Etats de la muraille et de la basilique	24
5. Contexte historique	25
6. Conclusion	26
Chapitre 3 : Géologie et origine des matériaux de construction	27
1. Introduction	28
2. Contexte Géologique	28
3. Echantillonnage et méthodes analytiques	32
4. Nature des matériaux de la muraille Romaine et de la Basilique	33
4.1. Les calcaires roses	33
4.1.1. Description des calcaires rose de la carrière (Dj. Doukkane)	33
4.1.2. Description macroscopique du calcaire rose de la muraille et de la Basilique	33
4.1.3. Description microscopique	34
4.2. Les tufs carbonatés	36

4.2.1. Description des tufs carbonatés de la carrière (Dj. Djoua)	36
4.2.2. Description macroscopique des tufs carbonatés de la muraille	36
4.2.3. Description microscopique des tufs carbonatés	36
4.3. Les calcaires beiges	38
4.3.1. Description des calcaires beiges de la carrière (Dj. Essen)	38
4.3.2. Description macroscopique des calcaires beiges de la muraille	38
4.3.3. Description microscopique des calcaires beiges	38
4.4. Les calcaires crayeux	40
4.4.1. Description des calcaires crayeux de la carrière (Djebel K ^{at} Soltane)	40
4.4.2. Description macroscopique des calcaires crayeux de la muraille	40
4.4.3. Description microscopique des calcaires crayeux	40
4.5. Les autres types de roches	42
5. Environnement de dépôt de roches carbonatées	43
6. Minéralogie des pierres de taille	44
6.1. Le calcaire rose	44
6.2. Le tuf carbonaté	45
7. Conclusion	47
Chapitre 4 : Caractéristiques des matériaux des carrières	48
1. Introduction	49
2. Masse volumique sèche et masse volumique saturée	49
3. Porosité	52
3.1. Porosité totale et porosité ouverte	52
3.2. Porosité au mercure et porosité connectée	54
4. Essai d'absorption capillaire	58
5. Propriétés ultrasoniques	62
6. Essai de compression uniaxiale	64
7. Conclusion	66
Chapitre 5 : Caractérisation de la dégradation de la Muraille et de la Basilique de Tebessa	68
1. Introduction	69
2. Cartographie des monuments	69
2.1. Cartographie des lithologies	70
2.2. Cartographie des formes d'altération	73
2.3. Cartographie des dommages d'altération	81
2.4. Indice des dommages	85
3. Comparaison de la dégradation entre les différentes façades	86
4. Caractéristiques pétrophysiques et minéralogiques des pierres de la muraille	88
4.1. Masse volumique sèche	88
4.2. Porosité ouverte	89
4.3. La porosimétrie au mercure MIP	89
4.4. Caractérisation minéralogique (XRD)	90
4.5. Concentration de sels selon la localisation des pierres	91
4.6. Caractérisation texturale (SEM-EDX)	92
4.7. Cartographie élémentaire (EDX)	93
4.8. Marteau de Schmidt	95
5. Conclusion	96
Chapitre 6 : Essais de vieillissement accéléré	98
1. Introduction	99

2. Essai de vieillissement accéléré	100
3. Résultats	101
3.1. Changement morphologiques (formes d'altération)	101
3.2. Perte de masse	103
3.3. Masse volumique et Porosité	105
3.4. Ondes ultrasoniques	106
4. Discussion des résultats	106
5. Conclusion	108
Conclusion générale	111
Bibliographie	114
Annexe	128

Listes des figures

Chapitre 1 :

- Figure 1.1 : Altération par le dépôt des algues (ICOMOS 2008) 7
Figure 1.2 : Dégradation des grés (ICOMOS 2008) 7

Chapitre 2 :

- Figure 2. 1 : Situation géographique de Tébessa (A) et situation de la muraille
Byzantine et de la Basilique Romaine (B) 20
Figure 2. 2 : Vue sur la muraille Byzantine (façade Nord) 22
Figure 2. 3 : Vue sur la porte de Caracalla 22
Figure 2.4 : Vue sur les piliers de la Basilique 23
Figure 2.5 : Vue sur les écuries de la Basilique 23
Figure 2. 6 : Plan de la muraille Byzantine et des paramètres climatiques l'influençant 24

Chapitre 3 :

- Figure 3. 1 : Géologie de l'Algérie de Nord et de la chaîne des Maghrébides
(Durand Delga, 1969) 29
Figure 3.2 : Carte géologique de Tébessa et localisation des carrières d'extraction
(Durozoy, 1953) 31
Figure 3.3 : Différents types de roches observées au niveau de la Basilique Romaine
tels que le Marbre (A) Brèche (B) et Granite (C) 43
Figure 3. 4 : Minéralogie de calcaire observée sous SEM 45
Figure 3.5 : Observation de la taille des cristaux de calcite recristallisés 45
Figure 3. 6 : Observation de la disposition des grains sur une surface de Tuf sous SEM 46
Figure 3. 7 : Observation de la cohésion des grains dans les pores sous SEM 46

Chapitre 4 :

- Figure 4. 1 : Schéma du dispositif expérimental de porosité totale à l'eau sous vide
(Rousset Tournier, 2001) 51
Figure 4.2 : Seuils de classe de porosité choisis pour cette étude (Beck, 2007) 54
Figure 2.3 : Schéma explicatif de la notion de rayon d'accès de pores d'une injection
de mercure (Beck, 2007) 56
Figure 4.4 Courbes des distributions des rayons poral avec la porosimétrie à intrusion
de mercure pour (A) le calcaire et (B) le tuf carbonaté 58
Figure 4. 5 : Méthode standard pour la mesure de coefficient d'absorption capillaire
EN-1925 (AENOR, 1999) 60
Figure 4.6 : Méthode continue de mesure de coefficient d'absorption capillaire
(Benavente et al, 2007) 60
Figure 4.7 : Calcaire W / S : Poids expérimental d'eau adsorbée par unité de surface,
 $W(t) / S$ par rapport à la racine carrée du temps, \sqrt{t} . 61
Figure 4.8 : Tuf carbonaté W / S Poids expérimental d'eau adsorbée par unité de surface,
 $W(t) / S$ par rapport à la racine carrée du temps, \sqrt{t} . 61
Figure 4. 9 : Relation entre le coefficient d'absorption capillaire et la porosité ouverte 61
Figure 4.10 : Dispositif de mesures des ondes ultrasoniques 62
Figure 4.11 : Relation entre la vitesse des ondes ultrasonique et la porosité totale
pour les calcaires roses et les tufs carbonatés 64
Figure 4.12 : Relation entre la résistance uni-axiale et la porosité totale pour les
calcaires roses et les tufs carbonatés 66

Chapitre 5 :

- Figure 5. 1 : Etapes de la cartographie des monuments (Fitzner et al., 1995) 70

Figure 5. 2 : Classification des formes d'altération (Fitzner et al., 1995)	73
Figure 5. 3 : Différentes formes d'altération (a) alvéolisation (b) Subefflorescence (c) écaillage (d) désagrégation granulaire	77
Figure 5. 4 : Relation entre formes d'altération et catégories des dommages (Fitzner et al., 1995)	82
Figure 5. 5 : Indices des dommages linéaires et progressif (Fitzner et al., 2002)	85
Figure 5. 6 : Valeurs de porosimétrie au mercure d'un calcaire dégradé	90
Figure 5. 7 : Diffraction des rayons X de différents échantillons de surface dégradée de calcaire rose	91
Figure 5. 8 : Image sous SEM d'une surface dégradée de calcaire rose au niveau de la façade Nord sur une écaille	93
Figure 5. 9 : Valeurs de nombre de rebonds sur des surfaces de calcaire rose sain et dégradé, et de tuf carbonaté sain et dégradé	95
Chapitre 6 :	
Figure 6. 1 : Protocole d'essai pour l'essai de cristallisation de sel	101
Figure 6. 2 : Essai de vieillissement accéléré : courbe de variation de la masse en fonction de chaque cycle de cristallisation saline avant et après le test pour le calcaire rose (A) et le tuf carbonaté (B)	105

Liste des tableaux

Chapitre 4 :

Tableau 4.1 : Masse volumique sèche et masse volumique saturée des tufs carbonatés	52
Tableau 4.2 : Masse volumique sèche et masse volumique saturée des calcaires roses	52
Tableau 4.3 : Porosité totale et ouverte des tufs carbonatés	53
Tableau 4.4 : Porosité total et ouverte des calcaires roses	53
Tableau 4.5 : Tailles des espaces poreux de calcaire rose et de tuf carbonaté sains déterminé par le porosimètre au mercure (MIP)	57

Chapitre 5 :

Tableau 5. 1 : Evaluation : Evaluation quantitative des lithologies en fonction des façades et des surfaces étudiées	73
Tableau 5. 2 : Quantification des formes d'altération selon les différentes façades et monuments	81
Tableau 5. 3 : Evaluation quantitative des catégories de dommages	84
Tableau 5. 4 : Evaluation quantitative des indices de dommages des différentes façades de la Muraille de Tébessa et de la Basilique	85
Tableau 5. 5 : Taux de récession, en relation avec les différentes façades et les différentes formes d'altération. T : tuf carbonatés, CR : calcaire rose, CB : calcaire beige, CC : calcaire crayeux, E : écaillage, Fr : fracture, A : alvéolisation, PM : perte de matière, S : salissure, EF : efflorescence, CB : croute blanche, C : coloration ; P : poudrage	88
Tableau 5. 6 : Valeurs de la masse volumique sèche et à l'état saine et dégradée de calcaire et de tuf carbonaté	89
Tableau 5. 7 : Valeurs de la porosité ouverte dans des pierres saines et dégradées	89
Tableau 5. 8 : Minéralogie des pierres saines issues des carrières et dégradées sous DRX	90
Tableau 5. 9 : Types et teneurs des sels en fonction de la hauteur par rapport au sol	92

Chapitre 6 :

Tableau 6 : Propriété pétrophysique avant et après le test de cristallisation saline pour le calcaire et le tuf carbonatés	105
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Listes des planches

Chapitre 3 :

- Planche 3. 1 : Vue panoramique des calcaires roses de la carrière de Dj. Doukkane (A) Calcaire rose de la muraille (B) Echantillons des calcaires roses issue de la carrière (C) et de la muraille (D).microfaciès des calcaires roses : wackestone-packstone à rudistes et lamelibranche (E) ; wackestone à gastéropodes et lamelibranche (F) ; Bio : bioturbation, G :gastéropode, L : lamelibranche, D : dolomite 35
- Planche 3. 2 : Vue panoramique des Tufs carbonatés de la carrière de Dj. Djoua (A) Tufs carbonaté de la muraille (B), Echantillons des tufs carbonatés issue de la carrière (C) et de la muraille (D). Microfaciès des tufs carbonatés essentiellement micritiques avec des mattes algaires (E) et une texture arborescente (F). M : matte algair, L : lamination, A : texture arborescente 37
- Planche 3. 3 : Vue panoramique des calcaire beige de la carrière Essene avec des traces de taille (A) et des calcaires beige de la muraille (B) échantillon d'un calcaire beige de la carrière (c) de la muraille (D) . Un microfaciès à grainstone et à microbrèches micritiques (E) , et observation des grainstone à coraux (F). m : microbrèche, c : coraux 39
- Planche 3. 4 : Vue panoramique des calcaires crayeux de la carrière de Dj. Kat Soltane (A) et au niveau de la muraille (B) échantillons d'un calcaire crayeux issue de la carrière (C) et un échantillon issue de la muraille (D). Un microfaciès à wackstone à ostracode (E) et riche en foraminifères (F), O : Ostracode, F : Foraminifère 41
- Planche 3. 5 : Cartographie élémentaire par analyse EDX sur une surface de calcaire sain (A) avec la distrubution des éléments chimiques tels que le : Ca : calcium (B), Si :silicium (C), Fe : fer (D), Al : aluminium (E) et distribution de tous les (B) éléments chimiques sur une surface saine (F). 46

Chapitre 5 :

- Planche 5. 1 : Cartographies des lithologies des différentes façades et monuments, façade Nord (A) Est (B) Sud (C) et au niveau de la Basilique (D) 72
- Planche 5. 2 : Cartographie des formes d'altération dans différentes façades de la muraille de Tébessa face Nord (A) Est (B) Sud (C) et au niveau de la Basilique (D) 79
- Planche 5. 3 : Cartographies des catégories de dommages au niveau des différentes façades de la muraille, façade Nord (A) Est (B) Sud (C) et de la Basilique (D) 83
- Planche 5. 4 : Cartographie élémentaire par analyse EDX sur une surface de calcaire rose dégradé (A) avec la distribution des éléments chimiques tels que le : Si : Silicium (B), S: soufre (C), Na : sodium (D), K : potassium (E), Ca : calcium (F), Cl : chlore (G) et distribution de tous les éléments chimique sur une surface dégradé (H). 94

Chapitre 6 :

- Planche 6 : Changement morphologique des pierres de taille calcaire rose et tuf carbonaté durant les cycles de cristallisation saline 103

Listes des abréviations

- ϕ : Porosité de la roche
 ϕ_o : Porosité ouverte
 ϕ_t : Porosité total
a : Longueur de l'échantillon en cm,
B : Frange capillaire
b : Largeur de l'échantillon en cm
C : Coefficients d'absorption capillaire,
c : Hauteur de l'échantillon en cm
 F_{max} : Force maximale appliquée lors de la rupture (en N)
m : Masse
 M_{hydro} : Masse hydrostatique de l'échantillon saturé dans l'eau,
Ms : Masse sèche de l'échantillon en g
 M_{sat} : Masse saturé a l'aire libre,
 M_{sec} : Masse de l'échantillon sec,
P : Pression d'injection (en pratique : $P \text{ (bar)} = 7,5 / R \text{ (}\mu\text{m)}$)
R : Rayon de pore
 R_c : Représente la résistance à la compression (en MPa),
S : Surface d'échantillon
t : Temps en seconde
v : Volume
 V_p : Vitesses de l'onde ultrasonique p
 V_s : Vitesse de l'onde ultrasonique s
 V_{total} : Volume total
 V_{vide} : Volume des vides
w : Quantité d'eau par unité de surface
x : Déplacement de la frange capillaire
 θ : Angle de raccordement mercure-vapeur de mercure à la surface minérale (en pratique : $\theta = 140^\circ$)
 ρ_{fluid} : Masse volumique de fluide
 $\rho_{matrice}$: Masse volumique de la matrice rocheuse
 ρ_{sat} : Masse volumique saturée
 ρ_{sec} : Masse volumique sèche
 ρ_{sec} : Masse volumique sèche
 σ : Tension superficielle du mercure (0,486 N/m à 25°C)
 σ_c : résistance à la compression uni-axial

La muraille Byzantine et la Basilique romaine sont les exemples représentatifs des sites historiques à Tébessa (Nord-Est Algérien), dont les calcaires roses de Turonien moyen et les tufs carbonatés de Quaternaire sont les matériaux de construction les plus utilisés dans ces édifices. L'investigation in-situ a montré que les formes d'altération les plus répandues sont l'écaillage, alvéolisation, efflorescence, fracturation, décoloration, croute blanche, poudrage et désagrégation granulaire. Ces formes d'altération sont produites par l'action saline (Gypse et Halite) qui sont reliée aux propriétés pétrophysique et texturale des calcaires roses et des tufs carbonatés. La quantification du degré d'altération, en utilisant les propriétés physico-mécaniques a révélé que la dégradation est caractérisée par une diminution de la masse volumique et une augmentation de la porosité pour le calcaire rose, alors que les tufs carbonatés sont caractérisés par une diminution de la masse volumique avec la diminution de la porosité. Le marteau de Schmidt a révélé que les dommages sont moyens à sévères dans les deux monuments étudiés.

Les propriétés pétrophysiques et de durabilité sont mesurés pour les deux types de pierres extraits des carrières. La porosité, le coefficient d'absorption capillaire, les ondes ultrasoniques et la compression uniaxiale sont utilisés pour caractériser les propriétés pétrophysiques, et le test de vieillissement accéléré par les sels est utilisé pour estimer leurs durabilités. Ces propriétés sont fermement liées à la microstructure de la pierre. En effet les tufs carbonatés montrent une excellente durabilité sous l'action saline et une faible résistance mécanique comparés aux calcaires. En outre, malgré la faible porosité et la résistance mécanique de ces calcaires, ils montrent une faible valeur de durabilité. Lorsque les micropores contribuent à la faible valeur de la durabilité des calcaires; dans les tufs, les macropores réduisent l'action saline sur la structure poreuse et augmente sa durabilité. Nos investigations ont montré que la muraille Byzantine et la Basilique romaine requièrent des mesures urgentes de préservation. Enfin, dans les constructions anciennes de Tébessa, les calcaires roses seront les plus dégradés que les tufs carbonatés.

Mots clés : Altération, dégradation, sels, calcaire, tufs

Abstract

The Byzantine wall and the Roman basilica are the main representative examples of historical sites in Tébessa (North-eastern Algeria), which pink limestones of Middle Turonian and carbonate tufas are the most used construction materials. In-situ investigations have shown the most common weathering forms are flaking, alveolisation, efflorescence, fracturing, discoloration, white crust, dusting, powdering and granular disintegration. These weathering forms are produced by the salt action (Gypsum and Halite) which are related to the petrophysical and textural properties of pink limestones and carbonate tufas.

Quantification of degrees of weathering using physico-mechanical properties revealed that degradation is characterized by a decrease in density and increased porosity for pink limestone, while carbonate tufas are characterized by a decrease in density with the decrease in porosity. Schmidt's hammer revealed that the damage is medium to severe in both monuments studied.

The petrophysical properties and durability are measured for both stone types which extracted from quarries. Porosity, capillary absorption coefficient, ultrasonic waves and uniaxial compression are used to characterize the petrophysical properties, and the salt crystallisation tests is used to estimate their durability. These properties are closely linked to the microstructure of the stone. Carbonate tufas show excellent durability under salt crystallization and lower mechanical strength than limestone. Limestone, on the other hand, despite its lower porosity and better mechanical strength, show lower durability values. While micropores contribute to the relatively lower value of sustainability; in tufas, macropores reduce the saline action on the porous structure and increase its durability. Our investigations have shown that the Byzantine wall and the Roman basilica require urgent conservation measures. Finally, in the ancient constructions of Tébessa, the pink limestone will be the most degraded than the carbonate tufas.

Keywords: Weathering. Degradation. Salt crystallization. Limestone. Tufas

ملخص:

يعد الجدار البيزنطي والكنيسة الرومانية أمثلة من المواقع التاريخية في ولاية تبسة (شمال شرق الجزائر)، ومن المواد الأكثر استخداماً في بنائها: الأحجار الجيرية الوردية ((Turonien moyen) والأحجار الكلسية (Tufs) أظهرت التحقيقات في المواقع أن من أشكال التدهور هي التغيير (Ecaillage) والتقطيع، alvéolisation، الطفح، والتكسير، والتلاشي، والقشرة البيضاء والغبار والتفكك الحبيبية. ويتم إنتاج هذه الأشكال بفضل الأملاح (الهاليد والجبس)، والتي ترتبط بالخصائص البتر وفيزيائية والتكوينية للحجر الجيري الوردية والحجر الكربوني (Tufs). كشفت درجة قياس التغيرات باستخدام الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للأحجار المتدهورة بالتميز بانخفاض في الكثافة وزيادة في المسامية للحجر الجيري الوردية، في حين تتميز أحجار (Tufs) بانخفاض في الكثافة مع انخفاض في المسامية.

تم قياس الخصائص الصخرية والمتانة لكلا النوعين من الحجارة المقطوفة من المحاجر. باستخدام المسامية ومعامل الامتصاص الشعري، والموجات فوق الصوتية وضغط أحادي المحور لتوصيف الخصائص البتر وفيزيائية، ويستخدم اختبار تسارع التدهور بالأملاح لتقدير متانتهم. ترتبط هذه الخصائص ارتباطاً وثيقاً بالبنية المجهرية للأحجار. في الواقع تظهر الأحجار الكاسية (Tufs) متانة تحت تأثير الملح وقوة منخفضة مقارنة مع الجير. وعلى الرغم من انخفاض المسامية والقوة الميكانيكية لهذه الحجر الجيري، فإنها تحمل قيمة منخفضة من المتانة ضد الأملاح.

عندما تسهم المسامية الصغيرة في انخفاض قيمة الاستدامة؛ فـ tufs، يقلل macropores تأثير الملح على بنية المسامية وزيادة قدرتها على التحمل.

وقد أظهرت تحقيقاتنا أن الجدار البيزنطي والكنيسة الرومانية تتطلب تدابير الحفظ العاجلة.

الكلمات الدالة: التغيير، التدهور، الأملاح، الحجر الجيري، الأحجار الكلسية

Introduction générale

Depuis les temps anciens, les pierres naturelles font les matériaux de construction les plus utilisés du fait de leurs disponibilités et durabilités. La plupart des monuments historiques dans le monde sont construits avec les pierres, qui sont soumises depuis leurs extractions à l'altération continue en relation avec l'environnement dans lequel elles se trouvent. L'altération est souvent proportionnelle à l'agressivité de milieu. Elle peut mener en un laps de temps relativement court à la ruine complète de la pierre et de l'édifice, contrairement à ce qui est couramment admis que la roche est pérenne.

A Tébessa, il existe une grande diversité de formations géologiques qui donne différentes variétés pétrographiques de pierres de construction. Parmi ces formations géologiques, les calcaires micritiques qui affleurent sur une importante aire géographique, elles étaient les plus disponibles pour la construction de ces monuments historiques. Les calcaires crayeux et les tufs carbonatés ont également servi à la construction de ces sites bien qu'ils soient présents en faible proportion dans les édifices à cause de leurs extensions géographiques limitées. D'autres pierres, d'origine magmatique (granite) et métamorphique (marbre) sont présentes sur les sites, mais vraisemblablement elles ont été importées à partir d'autres régions (Nord de l'Algérie et Italie).

Tébessa, compte plusieurs sites historiques, la muraille byzantine, la Basilique Romaine, le théâtre...etc. Ces sites constituent une attraction pour les archéologues et les touristes. La construction de ces sites date de plus de 1500 ans, ils commencent à montrer des indices de dégradation qui peuvent évoluer vers la ruine de ces édifices et l'effacement totale des traces du génie humain de l'art et la culture des romains en ce point précis du globe. Afin de préserver les valeurs culturelles et historiques que représentent ces monuments ainsi que leur intégrité, des mesures de restauration et conservation doivent être entreprises pour leur protection. Sachant que les mesures préventives sont à l'aval d'une étude géologique détaillée des facteurs, mécanismes et état de dégradation des pierres, d'une part et de la recherche de matériaux de remplacement d'autre part. Les pierres utilisées en restauration et les pierres du site doivent présenter une teinte et certaines propriétés physiques semblables. L'idéal serait d'utiliser en restauration le même type de pierre utiliser lors de la construction où la compatibilité des matériaux est très importante concernant la conservation des pierres en œuvre dans les travaux de restauration.

La conservation de la pierre est un processus complet qui implique la caractérisation des propriétés physico-chimiques et physico-mécaniques des matériaux, la description et la quantification de son altération, la compréhension des causes et des mécanismes de

détérioration, et l'application et le suivi des traitements de conservation appropriés. La détermination de la provenance de la pierre et la recherche sur la préservation des carrières historiques sont également importantes pour protéger la pierre archéologique.

Avant de procéder à la restauration d'un monument, il est nécessaire de démontrer l'effet des structure complexe de la roche tel que les bioturbations, les fissures, la porosité sur la durabilité des pierres. Dans cette étude, les propriétés physiques et morphologiques ont été considérées en utilisant le test de cristallisation saline.

La dégradation des matériaux de construction utilisés dans les sites historiques est décelée par la présence continue de matériaux au sol (perte de matériaux). L'augmentation de la dégradation des matériaux de construction utilisés dans les anciennes constructions et aussi les plus récents met en péril la structure des monuments. La question de la dégradation de la pierre est aussi ancienne que les monuments eux-mêmes. Grâce à l'examen des anciennes détériorations et des recherches sur la conservation des roches carbonatées, on a constaté une dégradation très prononcé qu'on le pense.

L'objectif principal de ce travail est l'étude par une approche multi-échelles, le comportement des pierres de la muraille et de la basilique de Tébessa vis-à-vis de la dégradation. En effet, il convient d'analyser et de comprendre les mécanismes induisant les dégradations des pierres en œuvre avant d'entreprendre des recherches sur les techniques de restauration et de conservation.

1°/ Il convient alors dans un premier temps de caractériser la pierre de bâti, ensuite rechercher les sites d'extraction de cette pierre. Pour cela, il faudra observer les pierres de la muraille et essayer de retrouver leur lieu d'extraction à l'aide d'une carte géologique et d'une investigation de terrain. En effet, l'exploration sur terrain et les investigations des archives permettra de déceler la carrière présumée d'extraction.

2°/ la caractérisation géologique des pierres de carrière a été effectué par une étude pétrographique, pétrophysique et minéralogique. Les principales pierres des monuments de Tébessa sont des roches carbonatées telle que les calcaires et les tufs carbonatés. Les propriétés pétrographiques permettront de connaître leur composition ainsi que leur milieu de formation (ou dépôt). Les propriétés pétrophysique détermineront, la masse volumique, la porosité totale, la porosité ouverte, la porosité connectée, la distribution des pores ainsi que leur taille, le coefficient d'absorption capillaire, la vitesse des ondes ultrasonique, ainsi que les

propriétés de résistance à la compression uni-axiale. Ces propriétés déterminées seront corrélées les unes aux autres, afin de connaître celles qui présentent un lien particulier.

3°/ la Cartographie de la dégradation a été effectuée par la cartographies des formes d'altération, catégories de dommages, surface de recul (récession) et indices des dommages linéaires et progressifs.

Des investigations doivent être effectuées pour déterminer les formes d'altération qui affectent les différentes pierres et qui sont corrélées à la localisation de la pierre dans le monument et à la façade d'exposition. Le taux de perte de matière sur les surfaces de pierre est mesuré (surface de récession) pour chaque type de pierre et pour chaque façade par rapport à la surface présumé d'origine où chaque pierre a été étudié individuellement. Les dommages causés par les dégradations seront définis pour chaque partie de la façade et ceci par rapport au degré des surfaces perdues ; Les indices des dommages linéaire et progressif seront calculés pour quantifier la dégradation et les dommages sévères.

4°/ L'essai de vieillissement accélérée (Cristallisation saline) a été effectué pour comprendre les processus de la dégradation.

L'essai de cristallisation saline est utilisée pour déterminer le comportement physique et chimique de ces pierres par rapport à l'action double de sels et de l'humidification séchage. Plusieurs paramètres sont mesurés tels que les changements morphologiques des surfaces des pierres, densité, porosité ouvertes et vitesses des ondes ultrasoniques. Ces propriétés physico-mécaniques sont corrélées avec les résultats recueillis des observations de terrains afin de comprendre les processus de dégradation. Le présent travail étudiera les principaux facteurs, c'est-à-dire les paramètres de la pierre qui contrôle la dégradation ainsi que de leurs processus.

**Chapitre 1 : Synthèses
bibliographiques sur
l'altération et la dégradation
des pierres de Taille**

1. Introduction

Dès l'exhumation, les roches à la surface de la terre subissent des processus d'altération physico-chimique qui conduisent à des changements minéralogiques et texturales et des dégradations. Les mêmes phénomènes affectent les monuments historiques qui sont construits par ces roches. En effet, les processus de dégradation des pierres qui forment les monuments sont déclenchés par les conditions d'expositions environnementales (facteurs externes) différentes du contexte géologique originel et déterminés par leurs caractéristiques intrinsèques (facteurs internes) (Dessandier et al., 2002). Les matériaux mis en œuvre dans les monuments historiques subissent de multiples agressions de la part de leur environnement. Ces agressions se traduisent par divers types d'altérations, dont la nature et l'intensité dépendent de la variété de la roche mise en œuvre, ainsi que de son positionnement sur le monument (Vergès-Belmin, 2010).

2. Notion d'altération et de dégradation

2.1. Altération-météorisation

La météorisation est l'altération des roches qui est définie comme étant l'ensemble des changements minéralogiques et texturales sous l'effet de l'attaque par les agents de l'atmosphère et l'hydrosphère depuis l'exhumation de la roche jusqu'à sa désintégration complète (Ollier et al., 1983). L'altération est définie encore comme toute modification du matériau qui n'implique pas nécessairement une dégradation de ces caractéristiques (ICOMOS, 2008). Un revêtement réversible appliqué sur une pierre peut être considéré comme une altération. (Figure 1.1).

2.2. La dégradation

La dégradation est une modification chimique ou physique des propriétés intrinsèques de la pierre, conduisant à une perte de valeur, de qualité ou à une entrave à son utilisation (ICOMOS, 2008) (Figure 1.2).



Figure 1.1: Altération par le dépôt des algues (ICOMOS 2008)



Figure 1.2: Dégradation des grès (ICOMOS 2008)

3. Formes d'altération

L'effet des conditions environnementales sur la structure de la pierre donne différentes formes d'altération. Les changements sur la surface des pierres qui se produisent par les processus d'altération et de dégradation peuvent être décrits à l'aide de terminologie spécifique utilisant des critères morphologiques et géométriques (Seidel et al., 2011).

4. Les différents types d'altération :

Les pierres de tailles débutent leurs altérations dans leurs nouveaux environnements d'utilisation par une perte de rigidité et de solidité puis à la désintégration totale de la pierre. Ces processus d'altération et de dégradation sont contrôlés par des facteurs intrinsèques et extrinsèques où les facteurs intrinsèques sont désignés par les caractéristiques physiques et chimiques de la pierre elle-même, telle que la composition minéralogique, les caractéristiques de texture, les propriétés pétrographique et pétrophysique, la surface et la densité des grains. Les facteurs extrinsèques quant à eux reflètent les conditions environnementales externes à la pierre, telles que le climat, la pollution, l'activité biologique, l'interférence avec d'autres matériaux de construction (pierres et mortier) et la composition de la solution dans le réseau poreux des matériaux (white, 2003). En général, les processus d'altération sont différenciés en termes d'altération chimique, physique et biologique (Grau, 2013). Ces différents processus d'altération interfèrent et, dans la plupart des cas, se renforcent mutuellement et sont influencés par l'impact anthropique. A titre d'exemple, les changements de porosité dans une pierre sont dû principalement aux désolidarisations des minéraux entre eux par le biais de l'altération chimique. Ces changements entraînent une variation de l'absorption de l'eau par la pierre qui sera élevés et donc une augmentation de l'altération physique. Ainsi, l'impact physique peut entraîner une absorption plus élevée d'eau et de polluants, ce qui accentue

encore l'altération chimique. L'altération physique conduisant à la séparation mécanique des grains minéraux est une condition préalable essentielle à l'altération chimique. L'altération biologique peut être considérée comme une forme de double processus. D'une part, les micro-organismes lichens, bactéries, champignons ou algues produisent des acides organiques qui servent de donneurs H^+ , ce qui entraîne des altérations chimiques (Wierzechos et Ascaso, 1998; Adamo et Violante, 2000; Dornieden et Gorbushina, 2000; Jones et al., 2000; Pinna et Salvadori, 2000). D'autre part, ils peuvent contribuer à un plus grand apport d'eau dans la pierre en raison de leur teneur en humidité plus élevée, ce qui implique des processus d'altération physique (Wihr, 1986).

En fonction de la nature des modifications que ces processus peuvent induire, ils peuvent être classés en trois groupes :

4.1. Altération physique :

L'altération physique décrit principalement la dissociation des constituants de la pierre par une altération mécanique et la désintégration structurelle de la pierre sans modification chimique et minéralogique (Steiger et al., 2011). Les résultats générés par ce type d'altération sont nombreux tels que : les fissures et fractures, la désintégration granulaire, l'écaillage, les desquamations ... etc. En effet, l'eau et les particules dissoutes tels que les sels et les argiles sont les paramètres principaux qui entrent dans le processus d'altération physique. L'eau a une action double lors de son entrée dans l'espace poreux. Il fait subir à la pierre soit des cycles de mouillage séchage ou des cycles de gel-dégel. En outre, l'eau agit par transport des sels solubles dans la pierre qui subissent alors plusieurs cycles de cristallisations, soumettant la pierre à des pressions destructrices (Charola, 2004). Selon Snethlage (1984) et Steiger et al (2011), les pressions générées soit de l'intérieur ou de l'extérieur de la pierre et qui dépassent la résistance mécanique de la pierre dégrade l'intégrité de la pierre.

L'action saline, gel-dégel, dilatation thermique et hydrique sont les processus de l'altération physique. Les principaux facteurs extrinsèques responsables de ces processus sont les changements de température, d'humidité et l'impact de la pollution ; par exemple, les gaz atmosphériques et les sels. Ces facteurs agissent souvent en concert ; ils se renforcent mutuellement par exemple gel-action saline, action saline-changements d'humidité (Steiger et al., 2011).

L'altération saline survient par les processus de cristallisation et ou par l'hydratation des sels contenue dans ces pores (Grau, 2013). Ces sels peuvent provenir des sources externes

transportés en solution par l'eau capillaire, par la vapeur d'eau ainsi que par les phases gazeuses (aérosols) (Charola, 2000; Doehne and Price, 2010). À l'intérieur de réseau poreux, ces sels peuvent cristalliser et induire des dommages. En fonction de la composition de la solution saline, différents mécanismes sont discutés, qui introduisent des contraintes sur la microstructure de la pierre, entraînant des dommages (Charola, 2000; Doehne, 2002; Ruedrich and Siegesmund, 2006). Ceux-ci comprennent, entre autres, la pression de cristallisation hydrostatique, la pression d'hydratation et la pression linéaire de croissance cristalline.

Pression de cristallisation hydrostatique : Cette pression se développe lorsque le volume total des cristaux de sel précipités et de la solution saturée est plus grand que celui de la solution sursaturée avant la cristallisation (Correns et Steinborn, 1939; Duttlinger et Knöfel, 1993).

Pression d'hydratation : Les sels peuvent généralement exister dans un certain nombre d'états d'hydratation. Le passage d'un état d'hydratation inférieur à un état d'hydratation plus élevé s'accompagne d'une expansion volumique dans le cristal de sel. Cela peut entraîner une pression importante sur les parois des pores du matériau. Le mécanisme d'hydratation a été examiné la plupart du temps pour tenter d'expliquer l'effet hautement destructeur du sulfate de sodium sur la pierre (Charola, 2000).

Pression de croissance cristalline linéaire (habituellement appelée pression de cristallisation) : C'est la pression résultant de la croissance du cristal dans la direction des parois des pores. Elle est largement exprimée par les travaux de Correns (1949) et Correns et Steinborn (1939). Selon Steiger (2005a), les travaux ultérieurs (Neugebauer, 1973; Xie et al., 1992; Benavente et al., 1999) concernant cette pression relient beaucoup plus la pression de cristallisation au degré de sursaturation. Charola (2000) a développé une autre approche pour calculer la pression de cristallisation à partir d'un modèle thermodynamique par analogie avec la description thermodynamique des dommages causés par le gel.

D'autres mécanismes peuvent également contribuer aux dommages causés par le sel notamment la dilatation thermique différentielle (coefficients d'expansion linéaires plus élevés), la pression osmotique, du cycle humide-sec (sels déliquescents) et des mécanismes chimiques (Goudie et Viles, 1997, Doehne, 2002). De nombreux auteurs semblent avoir un consensus commun sur la pression de cristallisation comme le mécanisme d'altération le plus plausible.

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSES BIBLIOGRAPHIQUES SUR L'ALTERATION ET LA DEGRADATION DES PIERRES DE TAILLE

L'altération par gel-dégel dans les pierres naturelles est due au stress causé par la croissance des cristaux de glace à l'intérieur des pores contenant l'eau (Steiger et al., 2011). Lorsque l'eau gèle, son volume augmente de 9% (Prick, 1995). De ce fait plus la roche contient de l'eau, plus elle est susceptible à une plus grande altération (Grau, 2013). C'est en effet, la pression hydraulique développée par l'eau poussée par les cristaux de glace qui engendre ce type d'altération (Thomachot, 2002). Le processus d'altération par gèle-dégel est étroitement liée à la porosité. L'eau se gèle à des basses températures dans les petits pores, ce qui inclut que l'eau commence à geler à partir des larges pores (Stockhausen, 1981 ; Scherer, 1999). Par ces phénomènes, on peut donc observer soit un écaillage en surface, une désagrégation sableuse, ou bien un délitage de la pierre sous forme de plaquettes (appelé gélidisjonction) ou encore un éclatement de la pierre.

Lors des changements cycliques de la température, la pierre subit des changements dimensionnels. Les augmentations et les diminutions de température conduiront à l'expansion du volume et, en sens inverse, à la contraction (Grau, 2013). Bien que les changements de température ne soient pas très importants, les cycles répéter de chauffage et refroidissement se traduiront par la fatigue du matériau, ce qui peut finalement conduire à la désagrégation de la pierre.

Les changements d'humidité dans les pierres entraînent des processus d'expansion et contribuent à leur altération (Weiss et al., 2004, Ruedrich et al., 2011). Ruedrich et al., (2011) utilisent le terme « dilatation hydrique » pour le gonflement hygrique (lorsqu'il est lié aux changements d'humidité relative HR) et le gonflement hydrique (lorsqu'il est associé à l'immersion dans l'eau) (Delgado Rodrigues et Charola, 1996), car ils décrivent les termes conditionnels plutôt que les mécanismes de la dilatation. Les principaux processus attribués à l'expansion de l'humidité sont le gonflement des minéraux argileux (Schuh, 1987; De la Calle et Suquet, 1988; Snethlage et al., 1995; Jiménez Gonzalez et Scherer, 2004; Dixon et Weed 1989; Moore et Reynolds, 1997). Les différents processus conduisant au gonflement des minéraux argileux dans l'environnement bâti sont décrits en détail par Ruedrich et al. (2011).

Les cycles de mouillage-séchage de la pierre de construction naturelle introduisent un stress sur la matrice de la pierre et contribuent à l'affaiblissement dans une perspective de long terme. Les formes d'altération attribués aux modifications de la longueur et aux changements d'humidité comprennent l'écaillage, l'exfoliation, les craquelures, les fissures, l'effritement et

l'érosion différentielle le long des discontinuités (Rodriguez-Navarro et al., 1997; Sebastián et al., 2008; Ruedrich et al., 2011).

Les charges mécaniques appliquées sur les pierres par des pierres sus-jacentes est un autre processus physique qui est directement lié à la structure du monument. En effet, sous l'action de sollicitations mécaniques trop importantes par rapport à celle de la roche, les contraintes peuvent provoquer la fissuration et même la rupture de la pierre (Rautureau, 2001).

En général, les différents facteurs extrinsèques, qui provoquent l'altération physique, sont plus efficaces quand ils agissent simultanément. Comme mentionné ci-dessus, l'expansion due à l'humidité est favorisée par la présence de sels, tout comme la dilatation thermique (Winkler 1994; Snelthage et Wendler, 1997). En présence d'humidité, l'altération due aux changements thermiques est renforcée (Koch et Siegesmund, 2004).

4.2. Altération chimique

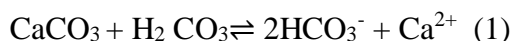
L'eau, les acides organiques et inorganiques ainsi que les gaz atmosphériques (CO_2 et O_2) attaquent les minéraux formant les roches et créent des nouvelles phases. Ce type d'altération se produit dans l'environnement naturel et est accéléré dans l'environnement bâti par l'influence anthropique (Grau, 2013). Les gaz dégagés dus à l'activité anthropique réagissent avec l'eau de pluie ou l'humidité dans les pierres et forment des acides agressifs, qui contribuent fortement à l'altération chimique (Kraus, 1988; Camuffo, 1992). Schäfer (1980) a constaté une oxydation du SO_2 en SO_4 de quatre à huit fois plus élevée dans les zones urbaines que dans les milieux ruraux. Dans tous ces processus, l'eau fonctionne comme un réactif ainsi qu'un milieu de transport pour les solutés et les particules (Schlabach 2000). L'espace poreux de la pierre offre un accès pour l'altération chimique de la matrice et des minéraux de la pierre. Comme mentionné précédemment, à fur et à mesure que les réactions d'altération sont présentes, la surface concernée augmente par conséquent l'altération s'intensifie.

Les différents minéraux formant les roches réagissent différemment à l'action de l'altération. Les minéraux contenant du fer, du manganèse ou du soufre dans des états d'oxydation inférieurs produisent des états d'oxydation plus élevés sous l'action de l'oxygène de l'eau (Kraus, 1988). Les roches carbonatées, c'est-à-dire les minéraux tels que la calcite et la dolomite, sont sujettes à l'altération par carbonatation, et se dissolvent généralement. La résistivité des minéraux contre l'hydrolyse diffère de manière significative. L'olivine montre

peu de résistance, tandis que l'augite, la hornblende, la biotite et les divers feldspaths sont plus résistants, tandis que la muscovite et le quartz se dégradent à peine.

Altération chimique des roches carbonatées

L'altération des roches carbonatées est due à l'action de l'acide carbonique avec la roche. Les minéraux carbonatés, à savoir la calcite et la dolomite, se dissolvent dans cet acide et sont facilement transportés sous leur forme ionique. La présence de composants acides à travers l'impact anthropique intensifie la dissolution. La réaction (1) montre la dissolution de la calcite dans l'acide carbonique (Okrusch et Matthes, 2009).



4.3. Altération biologique

Bien que l'impact de l'altération biologique ne soit pas étudié dans ce travail, certains aspects généraux de l'influence des micro-organismes doivent être discutés. En général, la présence de micro-organismes tels que les algues, les lichens, les bactéries et les champignons indiquent une humidité élevée, et favorise les processus d'altération (Wihr, 1986). L'altération biologique par les micro-organismes peut être divisée en processus d'altération biophysique et biochimique (Wierzchos et Ascaso, 1998; Adamo et Violante, 2000; Dornieden et Gorbushina, 2000; Pinna et Salvadori 2000). L'étendue d'altération biologique dépend de la distribution qualitative et quantitative des microorganismes et de leurs produits métaboliques. Les différentes pierres de construction naturelles constituent divers substrats et fournissent des conditions différentes de vie pour les organismes (Knöfel, 1979).

La colonisation de microorganismes entraîne la formation de patines d'altération sur des surfaces en pierre, par exemple sur du marbre constitué principalement de couches d'oxalate de calcium (Jones et Wilson, 1985), sont liées à l'altération biologique (Krumbein 1988; Warscheid et al., 1990). Les microorganismes produisent des acides organiques qui peuvent agir comme des acides ainsi que comme agents chélatants (fixation) (Jones et al., 2000).

5. Les facteurs d'altération

Selon Vergés-Belmin (2010) les principaux facteurs internes et externes sont résumés comme suites :

5.1- Facteurs internes

5.1-1. Composition minéralogique

La stabilité des minéraux dans des conditions de l'atmosphère et de l'hydrosphère conditionne la résistance à l'altération des roches qui les comprennent. Les roches sont

d'autant plus résistantes à l'altération qu'elles contiennent des minéraux solubles. Pour les calcaires, ils sont plus solubles dans les environnements acides. En plus, ils se désagrègent rapidement s'ils contiennent des minéraux hydrophiles tel que les argiles (Lasaga, 1984; Winkler, 1994).

5.1-2. La porosité :

Dans les processus d'altération, l'espace poreux est un paramètre très important car c'est l'endroit où toutes les réactions physico-chimiques surviennent. Les pores conditionnent le comportement de la roche vis-à-vis de plusieurs paramètres physiques tels que la densité, le comportement mécanique et les vitesses ultrasonique (Bourbié et al., 1986; Mavko et al., 1998; Zinszner and Pellerin, 2007).

5.1-3. Propriété thermique

Les propriétés thermiques des pierres sont déterminées dans une certaine mesure par le comportement spécifique de leurs minéraux. Par exemple, la calcite se dilate à mesure que la température augmente, mais cela ne se produit que dans les directions parallèles à l'axe c. Le long des directions perpendiculaires à l'axe C, la calcite se rétracte. Cette anisotropie dans les cristaux calcitiques très faiblement poreuses induit des contraintes qui initient une micro-fracturation spécifique, même à des températures inférieures à 100 ° C (Winkler, 1994).

5.1-4. Propriétés mécaniques

La résistance à la compression uni-axiale est le paramètre le plus couramment mesuré pour caractériser les pierres de construction, ainsi que la porosité totale, l'absorption capillaire et la vitesse ultrasonique. La gamme de résistance à la compression dans les pierres de construction s'étend de 6 à plus de 80 MPa en considérant la porosité qui varie de moins de 1% à 40% (Tiano et al., 1998). Les pierres à faible résistance à la compression et à porosité élevée sont généralement moins durables avec certaines exceptions pour d'autre pierre.

5.1-5. Dureté

La dureté des pierres et des minéraux est défini comme leur résistance aux rayures. Ce paramètre nous permet d'estimer la résistance à l'érosion mécanique ou la facilité de sculpture. Friedrich vonMohs (Moh, 1825) a noté dès 1825 que des minéraux d'origines différentes pouvaient avoir la même dureté. Dans l'échelle qu'il a conçu, nommée d'après lui, 10 minéraux communs sont classés selon des unités arbitraires allant de 1 à 10.

Depuis lors, d'autres systèmes ont été proposés sur la base de mesures d'indentation. Les scléromètres les plus communs sont ceux de Brinell, Vickers, Knoop et Shore ; la façon dont ils sont utilisés est détaillée dans (Winkler, 1994).

5.2- Facteurs externes d'altération

La plupart des facteurs d'altération extrinsèques sont liés à l'eau, soit directement (gel) ou indirectement (sels, pollution atmosphérique et actions biologiques).

5.2-1. L'eau

L'eau peut atteindre la pierre soit par l'action directe de la pluie ou par les remontées capillaires. La pluie agit de deux façons sur les pierres mises en œuvre dans les monuments. Elle a d'abord une action mécanique, plus ou moins importante suivant la position des pierres (les parties horizontales, comme les balustrades). Par cette action mécanique, la pluie lessive notamment les poussières et les produits d'altération qui se forment éventuellement à la surface de la pierre (Camuffo et al., 1982). La seconde forme d'action est chimique où la pluie n'est que très faiblement chargée en sels solubles. Mais même en l'absence de pollution, la pluie a un pH légèrement acide, dû à la dissolution du dioxyde de carbone naturellement présent dans l'atmosphère. Les pierres calcaires sont très sensibles à la dissolution par la pluie. Dans un environnement « propre », le taux de récession, pour un site exposé à une moyenne de 1000 mm de pluie par an, serait de l'ordre de 3 à 20mm en un millier d'années (Lipfert, 1989). En traversant une atmosphère polluée, la pluie ne se charge pas seulement en dioxyde de carbone. Les oxydes d'azote et de soufre entraînent une diminution du pH, tandis que les composés basiques augmentent la concentration saline tout en neutralisant son acidité. Or la solubilité de la calcite dépend largement du pH : le taux cinétique de dissolution augmente d'un facteur de 8 lorsque le pH chute de 5 à 4 (Lipfert, 1989).

En participant au processus de dissolution et de recristallisation des sels provenant du dépôt des constituants aérosolaires, la pluie, même en petites quantités, peut entraîner d'importantes altérations.

5.2-2. Cycle humidification-séchage

L'effet de la température est très important dans la mesure où les variations de température causent des changements d'humidité relative au sein de la pierre : les cycles d'humidification-séchage (Charola, 2004). Les pierres contenant des argiles sont les plus sensibles aux variations de l'humidité relative ambiante.

En effet les argiles ont tendance à gonfler lors de l'absorption de l'humidité et à se contracter lors du séchage. De plus, ces phénomènes de dilatation-retrait sont amplifiés par la présence de sels solubles ou par l'application de traitements de conservation (Wendler et al., 1991; Hammecker, 1993). Les stress mécaniques induits par les cycles de dilatation-retrait contribuent à la détérioration de la pierre.

De façon générale, la présence d'humidité dans la pierre favorise les altérations dues à d'autres facteurs. Par exemple, les changements d'humidité relative peuvent être particulièrement nocifs lorsque la pierre contient des sels solubles, surtout à l'intérieur d'un monument.

5.2-3. Le gel

A l'extérieur, la température agit de façon directe. Les variations de température proches de 0°C entraînent des phases de gel et de dégel de l'eau contenue dans les pierres, et provoquent les dommages les plus rapides dans les régions froides et humides. Lorsque l'eau contenue dans le réseau poreux du matériau se transforme en glace, l'expansion volumique est de 9% et donc la pression exercée sur la paroi des pores s'intensifie de façon considérable, de 500 kg.cm⁻² à 2000 kg.cm⁻² (Faugère et al., 1993). La sensibilité des pierres vis à vis du gel dépend des caractéristiques de leur réseau poreux, ainsi que de leur résistance mécanique. Pour estimer la vulnérabilité des matériaux poreux, Hirschwald (1908) a défini le coefficient de saturation S₄₈ (ou coefficient d'Hirschwald), correspondant au quotient de la porosité libre accessible à l'eau à pression atmosphérique sur la porosité totale accessible à l'eau. En observant que les dégâts sont plus importants lorsque le matériau poreux est entièrement rempli d'eau, il a déterminé que si le coefficient est supérieur à 0,8, c'est-à-dire que l'eau peut naturellement remplir 80% de la porosité, la pierre est alors vulnérable au gel. Ainsi, à porosité égale, les pierres possédant des pores larges résistent mieux au gel que des pierres à pores fins. De plus, la présence au sein d'une même pierre de pores fins connectés à des pores plus larges augmente la vulnérabilité de celle-ci face au gel (Fitzner et Snethlage, 1983).

Les cycles gel-dégel entraînent une diminution de la proportion des pores fins (< 2 µm) et une augmentation de celle des pores larges (Thomachot et Jeannette, 2002), ils favorisent la propagation de microfissures, causées par les variations de pressions, et les phénomènes de dissolution (Nicholson, 2001). De façon générale, les altérations dues au gel provoquent un changement de la structure porale, pouvant conduire à des dommages importants de la pierre.

5.2-4. Les sels

Les sels solubles comptent parmi les agents d'altération et de dégradation les plus importants pour les matériaux poreux. En effet, la présence de sels dans une pierre et par le biais des mécanismes de cristallisation et de dissolution, peut entraîner des écaillages, desquamations, des désagréments et des efflorescences (Grau, 2013). Les systèmes salins, les plus fréquemment observés sur les monuments, sont basés sur cinq cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) et cinq anions (SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , $\text{C}_2\text{O}_5^{2-}$) (Vergès-Belmin, 2001).

Les propriétés chimiques et physiques des sels déterminent leur comportement et donc leur nocivité vis-à-vis des matériaux constituant le monument. Cependant, les attaques chimiques par les sels sont plutôt rares, ce sont surtout les propriétés physiques des sels, en particulier leur solubilité et leur humidité relative d'équilibre, qui jouent un rôle dans la nature des altérations auxquelles les sels sont liés.

Lors d'un séchage lent, les sels les moins solubles cristallisent en premier, donc proche de la surface ou de la source, alors que les sels les plus solubles imprègnent le matériau en profondeur (Arnold et al., 1979). Les sels les plus nocifs pour un site donné sont ceux dont l'humidité relative d'équilibre se situe dans le domaine de variations de l'humidité relative (diurnes ou saisonnières). En effet, avec les variations d'humidité relative, les sels subissent des cycles de cristallisation-dissolution, qui entraînent des variations de pression au sein des pores, et conduisent ainsi à l'altération du matériau poreux (Benavente et al., 2007a; Steiger et al., 2011; Grau, 2013).

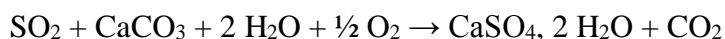
5.2-5. La colonisation biologique

On observe un effet pionnier : les premiers microorganismes déposés, en général les bactéries, modifient les propriétés de surfaces du substrat ce qui facilite l'implantation de futurs organismes et améliore les conditions de vie. La formation de ces premiers biofilms augmente la rétention d'eau, et donc facilite le dépôt d'aérosols nutritifs et de ce fait le développement d'autres organismes (Koestler et al., 1997). Au stade final, le microorganisme meurt et est éliminé par des forces physiques extérieures (pluie, vent.), en détachant parfois une partie de la croûte superficielle de la pierre (Chen et Czerwinski., 2000; Guillitte et Dreesen, 1995). Le cycle continue ensuite avec une nouvelle colonisation de la surface de pierre.

5.2-5. Les polluants atmosphériques

a. Le dioxyde de soufre

Parmi les polluants atmosphériques, le dioxyde de soufre est le composé le plus agressif pour la pierre (Vergès-Belmin, 2010). Lorsqu'il est transporté par l'air, on parle de « dépôts secs ». Le dioxyde de soufre réagit, alors, directement avec la calcite de la pierre en présence d'humidité pour former du gypse. Sous forme simplifiée, l'équation-bilan de cette réaction peut s'écrire :



Dans les zones abritées, le gypse s'accumule. Ainsi la croissance d'une croûte à la surface de la pierre est observée ; elle s'enrichit en particules : cendres volantes, particules contenant des métaux comme le nickel, le fer, qui jouent ensuite un rôle de catalyseur dans la réaction de formation du gypse (Vergès-Belmin, 2010). Dans les zones exposées aux pluies, le gypse, qui vient de se former, se dissout lors des épisodes pluvieux. Il est alors soit éliminé par ruissellement, soit transporté dans une zone protégée de la pluie où il pourra s'accumuler (à la surface ou au sein de la pierre).

b. Les oxydes d'azote

Selon Vergès-Belmin (2010), l'impact des oxydes d'azote (NO_x) est moindre que celui du dioxyde de soufre. Bien que les oxydes d'azote se déposent sur les pierres calcaires sous forme de « dépôt sec », les cinétiques sont très lentes.

c. Les particules

Les particules solides des aérosols atmosphériques ont des origines diverses. Les sources naturelles sont principalement les océans, les déserts et les volcans ainsi que des sources biologiques (Vergès-Belmin, 2010). La proportion de particules d'origine anthropique ne correspond qu'à 4 à 5 % des émissions globales, mais leur impact en milieu urbain est considérable, notamment en ce qui concerne l'encrassement (salissure) et la formation de croûtes noires. De façon générale, l'accumulation des particules à la surface des pierres mises en œuvre provoque des encrassements (salissure) qui représentent l'élément le plus rapidement visible de l'impact de la pollution atmosphérique sur les matériaux (Vergès-Belmin, 2010).

6. Conclusion :

Les propriétés pétrophysiques sont des facteurs clés intrinsèques contrôlant l'altération et la dégradation des pierres et sont fréquemment mesurées à l'aide de plusieurs techniques de

CHAPITRE 1 : SYNTHÈSES BIBLIOGRAPHIQUES SUR L'ALTERATION ET LA DEGRADATION DES PIERRES DE TAILLE

caractérisation des matériaux. L'analyse des propriétés pétrophysique et minéralogiques des pierres de construction utilisées dans les monuments est essentielle pour comprendre les principaux facteurs de dégradation dans des conditions environnementales réelles (Hammecker, 1995). De plus, cette caractérisation est également cruciale pour les restaurateurs et les conservateurs afin de mieux concevoir des stratégies de remplacement lorsqu'un monument en pierre présentant un intérêt culturel dégradé doit être réparé.

**Chapitre 2 : Contexte
géographique et aperçu
générale sur la Muraille et la
Basilique de Tébessa**

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET APERÇU GENERALE SUR LA MURAILLE ET LA BASILIQUE DE TEBESSA

1. Introduction

L'exposition à l'environnement constitue une menace pour la pierre de construction. En effet, la situation géographique d'une région est sous l'influence de plusieurs paramètres qui définissent le climat de la région. Les monuments sont construits pour durer et sont donc exposés très longtemps à un changement climatique. De ce fait la connaissance des paramètres climatiques d'une région est essentielle ainsi que la localisation et l'exposition des façades.

2. Situation géographique et administrative

La région de Tébessa se trouve à 45 km de la frontière Algéro-tunisienne et à plus de 600 km de la capitale d'Alger (Figure 2.1 A). Les coordonnées géographiques de la ville de Tébessa sont de 35° 24' 19" Nord et 8° 06' 59" Est. La ville de Tébessa s'élève à 910 m d'altitude. Elle est limitée :

- A l'Est par la frontière Algéro-Tunisienne,
- A l'Ouest par les wilayas d'Oum El Bouaghi et Khenchela,
- Au Nord par la wilaya de Souk-Ahras,
- Au Sud par la wilaya d'El Oued,

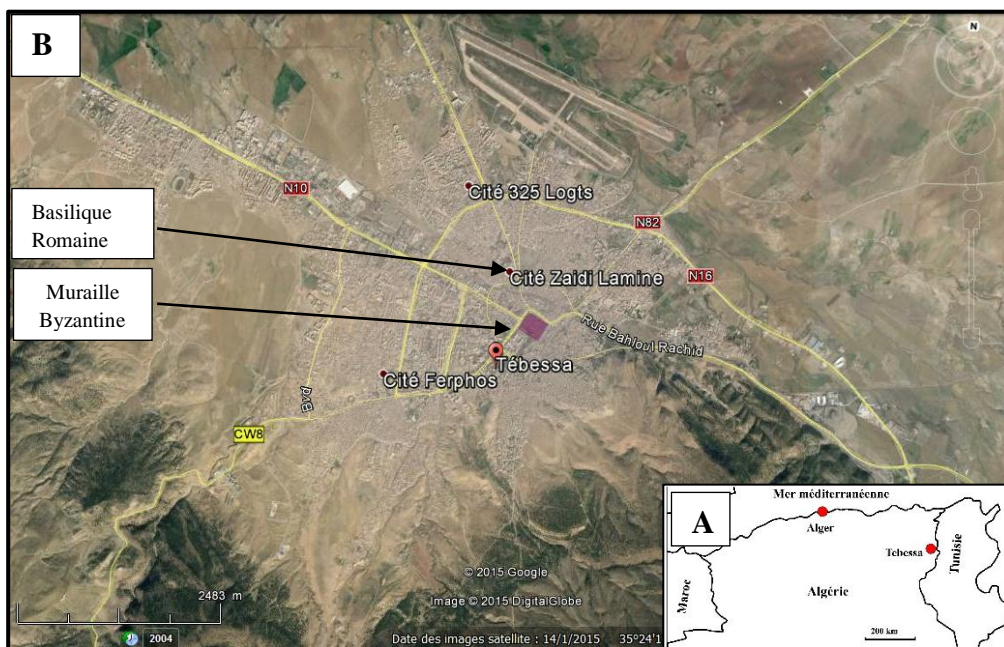


Figure 2. 1: Situation géographique de Tébessa (A) et situation de la muraille Byzantine et de la Basilique Romaine (B)

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET APERÇU GENERALE SUR LA MURAILLE ET LA BASILIQUE DE TEBESSA

En plein centre de la ville de Tébessa, se trouve la Muraille Byzantine de Tébessa (Figure 2.1 B). Non loin de là, à moins de 1 km au NNE de la muraille Byzantine se trouve la Basilique Sainte-Crispine Romaine. Avec ces quatre façades, la muraille Byzantine est orientée NNE-SSW et entourée par un réseau routier dense. En ce qui concerne la Basilique Romaine, il sépare deux routes moins fréquentées. Ces deux monuments historiques sont la propriété de l'état algérien qui est sous la surveillance et la protection de l'Office national de la gestion et d'exploitation des biens culturels sous l'égide de Ministère de la culture.

Sur le plan géomorphologique, la ville est limitée par plusieurs montagnes, au sud par Djebel Ozmor, au SSW par Djebel Doukkane, et à l'Est par le Djebel de Youks et au nord par le fossé d'effondrement de Morsot.

2.1.Climat

Tébessa fait partie des hauts plateaux telliens de l'étage bioclimatique semi-aride caractérisé par un hiver froid et un été très chaud. L'été se caractérise par des températures moyennes de l'ordre de 26 °C, avec un maximum au mois de juillet de 35 °C. L'hiver compte à lui, se caractérise par des températures moyenne de 9 °C et un minimum de -2°C.

L'humidité relative (moyenne annuelle) est de 59,07 %. Elle atteint ses valeurs maximales durant les périodes d'hiver et printemps avec des valeurs de 70% (ANRH, 2015), les valeurs minimales sont atteintes durant les mois de juillet et Aout avec des taux atteignant 40%. Les précipitations enregistrées montrent que le mois le plus pluvieux est le mois de mars avec une moyenne de précipitation de 42.5 mm, par contre le mois de juillet est le plus sec avec une moyenne de précipitation de 11.4 mm.

Les vents dominants sont ceux du Nord-Ouest, Sud Est et Ouest (ANRH, 2015). Les vents du Nord et du Nord-Ouest amènent les pluies pendant la saison humide et adoucissent le climat en réduisant les fortes chaleurs durant l'été, leur fréquence est de 46 % (ANRH, 2015). Il est à noter la faible fréquence des vents du Nord. Les vents du Sud Est et Sud-ouest sont généralement des vents secs qui accentuent les fortes chaleurs en été, leur fréquence importante représente 32 % par rapport au total. Les vents de direction Sud sont marqués par le Sirocco, qui est un vent chaud et sec et qui souffle en été en direction du sud vers le nord. La partie nord de la wilaya n'est pas très exposée au Sirocco. Les monts de Tébessa et les Nemamchas constituent une barrière naturelle qui atténue l'intensité de ce vent. L'enneigement est fréquent en hiver dans la région. Chaque année, il neige surtout sur les hauteurs : monts de Tébessa et des Nemamchas. La moyenne annuelle selon les données de Seltzer est de 6,8 jours/ an (ANRH, 2015). La neige joue un rôle important dans

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET APERÇU GENERALE SUR LA MURAILLE ET LA BASILIQUE DE TEBESSA

l'alimentation des nappes phréatiques. Le nombre moyen de jours de gelées est de 18,9 jours/an. La période d'hiver enregistre 80 % des gelées annuelles. Le maximum de gelées est enregistré durant les mois de décembre (5,3) et de janvier (5,9) (ANRH, 2015).

La moyenne annuelle de journées de grêle est de 3 jours/ an répartie généralement entre les mois de janvier et de juin, avec un maximum de 0,5 jours au mois de mai, le minimum se situe au mois d'octobre (ANRH, 2015).

2.2.Végétation

La végétation naturelle de la wilaya de Tébessa se caractérise par des espèces qui s'adaptent aux conditions pédoclimatiques de la région. Les différentes espèces qui la composent correspondent à l'étage semi-aride. On y trouve le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) (Apiacées), le chêne vert (*Quercus ilex* L.) (Fagacées), le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea* L.) (Cupressacées), le romarin (*Rosmarinus officinalis*) (Labiatae) et l'alfa (*Stypenacissima* L.) (Graminées). Ces différentes formations trouvent des conditions plus ou moins favorables à leur développement, les précipitations qui dépassent les 300 mm/an et les sols calcaires.

3. Description des deux monuments :

3.1.La muraille byzantine de Tébessa :

La muraille byzantine de Tébessa constitue un Rampart gigantesque avec une longueur de 320 m (Façade Nord) et de 270 m de largeur (Façade Est) (Figure 2.2). La largeur de la muraille est de 2 m avec une hauteur qui est de 7 m et atteint les 10 m dans les tours.

Cette muraille est constituée de 14 tours de surveillance et 4 portes principales.

Ces portes sont : la porte de Caracalla (Fig. 2.3), Cirta, Salomon et la porte de chahla.



Figure 2. 2 : Vue sur la muraille Byzantine (façade Nord)



Figure 2. 3 : Vue sur la porte de Caracalla

3.2. La basilique Sainte Crispine Tébéssa :

La basilique est à moitié détruite surtout en ce qui concerne les piliers et le toit (Figure 2.4). Cette basilique est entourée par les écuries et des maisons des esclaves et prêtres. L'escalier d'honneur qui donne accès sur l'entrée de la basilique est immense (Figure 2.5).



Figure 2.4 : Vue sur les piliers de la Basilique.



Figure 2.5: Vue sur les écuries de la Basilique

4. Donnée de l'état actuel des monuments :

4.1. Orientations générales des façades :

Au niveau d'un monument construit par des pierres de tailles, les différentes pierres qui le composent ne se dégradent pas de manière uniforme car les parties les plus saillantes sont souvent les plus fragiles (Janvier-Badosa2012). Les reliefs retiennent l'humidité sur les faces horizontales, et génèrent une surface d'exposition plus élevée sur un mur droit rapporté au volume de la pierre, ce qui conduit à des variations plus importantes (cinétique et amplitude) de température et d'humidité relative (Janvier S, 2012).

L'orientation des façades joue également un rôle dans le processus d'altération. La muraille Romaine présente quatre façades (Fig. 2.6) orienté NEE, SWW, SEE, NWW. En effet, l'ensoleillement direct, la direction du vent et des précipitations sont différents selon l'orientation des Façades. Les façades NEE, NWW sont longées par des voies routières très fréquentées. La façade SEE quant à elle, est parallèle à une route de moindre importance avec le marché de la ville juste en face. Par contre la façade SWW est limité par des constructions et non pas par une route. Depuis 2017 elle est longée par une piétonnière.

Toutes les façades sont touchées par l'ensoleillement sauf la façade SWW qui est quand a-t-elle abrité par les arbres. Les vents dominants viennent en générale de NEE, NE. Les vents chauds viennent du SWW.

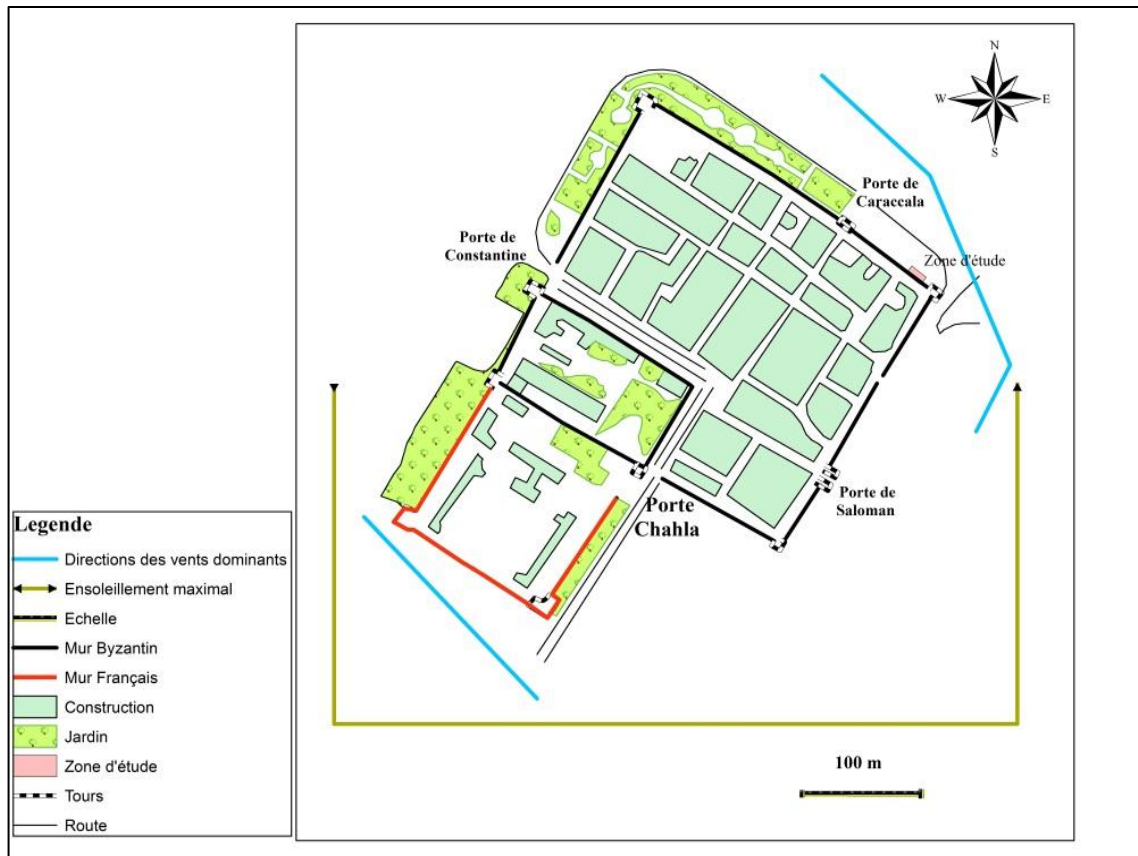


Figure 2. 6 : Plan de la muraille Byzantine et des paramètres climatiques l'influençant

4.2. Etats de la muraille et de la basilique :

La muraille byzantine de Tebessa et la basilique sont deux importants monuments de la région des Aurès au Nord de l'atlas Saharien qui demeurent encore debout avec des façades qui montrent leurs états de conservation. La variété des pierres utilisées pour la construction de ces deux monuments montre une large gamme de morphologie de détérioration. Le calcaire est utilisé d'une manière large, il montre une dégradation importante comparé aux autres roches utilisées.

Tebessa est une grande ville située dans le fossé de Morsot et entourée au sud et à l'ouest par une chaîne montagneuse. La pollution urbaine de la région est due principalement à l'activité automobile et surtout pour la muraille qui se situe en plein centre-ville. La présence de substances blanches à la surface des pierres calcaires amène à penser qu'elles sont influencées par l'action saline. Cette action saline a pour origine plusieurs sources anthropiques et naturelles telles que la pollution atmosphérique et des sels contenues dans le sol et qui remontent par capillarité (Steiger et al., 2011). L'état de conservation de la muraille

byzantine est médiocre. Son état de dégradation est avancé avec la présence de plusieurs formes d'altération.

Pour la basilique son état de conservation est bon vu qu'il est clôturé et surveillé. La dégradation touche l'ensemble des pierres qui constitue l'édifice surtout les colonnes et les murs exposés à l'action des agents naturels et anthropiques.

5. Contexte historique

À la convergence des hauts plateaux et de l'atlas saharien, la région de Tébessa est riche en vestiges émouvants des civilisations qui se sont succédées dans ces contrées actuellement semi-arides à savoir, les romains, les berbères et les byzantins. Nous y trouvons les escargotières, les grottes avec gravures rupestres, les tombeaux puniques, les édifices romains et byzantins, les mosquées et les bains turques ainsi que les stations préhistoriques de Hammamet et Bekkaria (Castel, 1912).

Les plus célèbres des constructions sont le temple de Minerve, la basilique romaine, le site de Caracalla, la muraille byzantine et le théâtre romain (Fosse, 1952). La muraille byzantine fut construite au 6ème siècle par le général byzantin Salomon pour des nécessités sécuritaires et politiques (Castel, 1912). La muraille byzantine est flanquée de quatorze tours carrées et s'ouvrent sur l'extérieur par quatre portes. L'une de ces quatre portes est l'arc de triomphe (porte de Caracalla) datant de 214 après J.-C. Il fut élevé en vertu d'une disposition testamentaire de Cornelius Egrilianus, préfet de la 14^è légion de Pannonie et originaire de Théveste. Cet édifice, qui servait à l'entrée Nord de la ville, est disposé en carré à la jonction de deux voies. Le temple dédié à Minerve date du début du 3^{ème} siècle. Les murs intérieurs de ce temple sont ornés de belles mosaïques. Nous y trouvons à l'intérieur divers outils préhistoriques.

L'ensemble basilical situé à l'extérieur des enceintes de la vieille ville au Nord de l'arc de Caracalla, est entouré de chapelles, baptistères, catacombes et jardins (Truillot, 1902). Il contient des allées, des écuries, de gigantesques escaliers, des chemins souterrains et beaucoup d'édifices romains. Cet édifice basilical, consacré à une sainte locale, sainte Crispine, et datant de la fin du 4^{ème} siècle, est l'un des plus grands d'Afrique. Non loin du marché central de la ville, se trouve les ruines d'un amphithéâtre datant du 4^{ème} siècle. (Cagnat, 1909). La ville de Tébessa s'est développée initialement à partir de ces établissements romains et byzantins à l'intérieur de l'enceinte byzantine à l'époque française. Après l'indépendance et avec l'ampleur des développements démographique, économique et

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET APERÇU GENERALE SUR LA MURAILLE ET LA BASILIQUE DE TEBESSA

urbain, la ville s'est étendue à l'extérieur de la muraille (Soltani, 1994), Nonobstant ses valeurs socio-économiques historiques inestimables, ce patrimoine matériel est victime de dégradations multiples dues au vieillissement, à la pollution et aux restaurations inadaptées.

6. Conclusion :

La ville de Tébessa est caractérisée par un climat semi-aride et à une altitude de 910 m. Les monuments qui sont construits sont influencés par les conditions climatiques et anthropiques. Les façades de la muraille de Tébessa Est et Sud sont beaucoup plus affectées par les vents. L'ensoleillement touche toutes les façades dues à leurs orientations mais les façades Sud et Est sont les plus exposées. En effet, la façade Nord est beaucoup plus exposée continuellement à l'humidité due aux pluies ou aux remontés capillaires. Les cycles de séchage-humidifications est un processus affectant les pierres de la région.

Chapitre 3 : Géologie et origine des matériaux de construction

1. Introduction :

La région de Tébessa comprend une grande diversité de formations géologiques dont leurs roches ont servi dans le bâti de son patrimoine culturel et historique, il s'agit des calcaires roses et des tufs carbonatés qui ont été largement exploitées en raison de leur proximité et leur facilité d'extraction. Pour estimer l'évolution de la qualité des pierres qui ont servi à la construction de la muraille et de la basilique de Tébessa, il faudra en premier lieu retrouver les carrières d'où elles ont été extraites. Le lieu d'extraction servira à déterminer l'origine et le milieu de dépôts de ces roches qui s'appuiera essentiellement sur les données géologiques.

Afin de mettre en évidence la durabilité et la résistance de ces roches, elles seront tout d'abord décrites pétrographiquement (composition et texture des roches) avec une mise au point sur la porosité qui aura un intérêt primordial dans l'étude des propriétés pétrophysiques (chapitre 4).

Il faut savoir, qu'à l'heure actuelle, les édifices bâtis à l'aide de ces matériaux nécessitent régulièrement des travaux de restauration, pouvant aller jusqu'au remplacement de blocs par des pierres extraites des carrières d'origine ; ceci afin de garder l'homogénéité de la structure ainsi que sa valeur historique et culturelle.

2. Contexte Géologique :

Avant de décrire les origines des pierres de taille sur le plan pétrographique, il sera utile de connaître la nature et le contexte géologique global des roches. Sur le plan géologique, la région de Tébessa appartient à la chaîne atlasique qui fait partie de la chaîne des Maghrébides (Fig.3.1), cette dernière comprend :

- Le domaine interne avec le socle cristallophyllien et la dorsale calcaire (Durand Delga, 1969 ; Bouillin et Raoult, 1971; Raoult, 1974; Bouillin, 1979; Baudelot et Géry, 1979; Vila, 1980) ;
- Le domaine des flyschs mauritaniens et massylien (Vila, 1980; Wildi, 1983) ;
- Le domaine externe avec : les nappes telliennes, le domaine néritique, le domaine des avants pays et le domaine atlasique (Delga, 1969; Raoult, 1974; Bouillin, 1979 ; Vila, 1980).

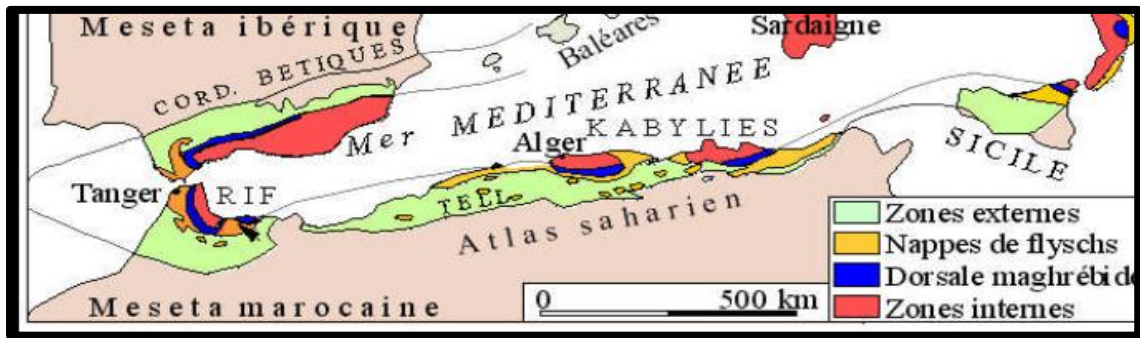


Figure 3.1 : Géologie de l'Algérie de Nord et de la chaîne des Maghrébides (Durand-Delga 1969)

Tébessa se trouve dans la partie NE de l'atlas Saharien et appartient au domaine atlasique, celui-ci comprend une longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant jusqu'à la Tunisie. Elle a fait l'objet d'étude géologique par plusieurs auteurs (Durozoy, 1956; Blés, 1969; Fleury, 1974; Vila, 1974 ; Kowalski and al., 1995a, 1996, 1997).

La plaine de Tébessa correspond un grand fossé d'effondrement qui recoupe orthogonalement des plis anticlinaux et synclinaux d'axes NE-SW. La plaine est entourée de part et d'autre par deux grands ensembles d'affleurements calcaires, séparés par des dépressions. Plusieurs directions de failles sont recensées au niveau de ces formations avec des directions dominantes N160° et N30°. Les massifs constituant la région proche de Tébessa sont : au nord : le massif de Gouraye, à l'est le massif de Bekkaria, à l'ouest le massif de Youks et au sud Dj Doukkane, Djebel Djoua et Djebel Ozmor (Fig. 3.2).

Sur la base d'étude bibliographique (Coquand, 1862; Durozoy, 1953) plusieurs massifs montagneux ont été utilisés par les romains, pour l'extraction des pierres de tailles utilisées dans la construction des sites historiques de Tébessa. Dans les descriptions géologiques et paléontologiques de la région Sud de la province de Constantine (Tébessa actuellement) Coquand (1862) signale que le Dj Doukkane est le massif utilisé pour l'extraction de pierre de taille calcaire (Fig.3.2). En effet, sur le plan litho-stratigraphique, ce djebel est formé à la base par de Turonien moyen qui est représenté par une assise massive de 80 à 100 m d'épaisseur de calcaires roses bioturbés, ces bioturbations sont de couleur ocre, formés de dolomites et d'oxydes de fer. Les autres formations sont des calcaires dolomitiques et des dolomies (Durozoy, 1953). L'épaisseur des bancs est supérieure à 1m, sauf dans la partie inférieure qui comprend uniquement des calcaires marneux aux environs immédiats de Tébessa avec des bancs de 30 cm. A l'Est du Djebel Doukkane, dans la région du Dj. Anoual, l'ensemble est

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

presque entièrement dolomitique. Les calcaires massifs ont un caractère récifal ainsi qu'en témoignent les fossiles recueillis : *Radiolites lumbricalis* d'Orb. (?) *R. cornupastorit*.

Ils sont surmontés par des calcaires du Turonien supérieur qui ont également un aspect récifal et qui sont très riches en fossile à leur base. Cet étage qui est épais de 160 m et comprend de bas en haut : des marnes noires souvent lumacheliques et rogneuses, des marno-calcaires gris en plaquettes à altération blanchâtre suivis des marnes noires gypsifères.

Au sommet de Djebel Doukkane, le Maestrichtien moyen surmonte le Turonien supérieur avec une assise très constante de 80 m de calcaires blancs massifs, bien lités avec des bancs inférieurs à 40 cm d'épaisseurs, contenant de nombreuses empreintes d'Inocérames (*Jnoceramut reaularis* d'Orb. (Durozoy, 1952).

Le Turonien moyen a été l'étage le plus adéquat pour l'extraction des pierres de taille, avec les calcaires roses d'épaisseur métrique.

La base de Djebel Djoua au Sud-Est de la ville, constitue la deuxième source d'extraction des pierres de taille. Sur le plan litho-stratigraphique, cette carrière est formée par des tufs carbonatés de couleur grise. Ce type de roche c'est déposé autour des sources froides et comprend des carbonates renfermant des débris de plantes.

D'autres carrières romaines anciennes ont été localisées au Nord de Tébessa dans le Djebel Essen également composé par le Turonien moyen représenté par des calcaires beiges en bancs pluri-décimétriques.

Il existe certainement d'autres carrières exploitées du temps des romains mais pas pour la construction de la muraille et la basilique de Tébessa.

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

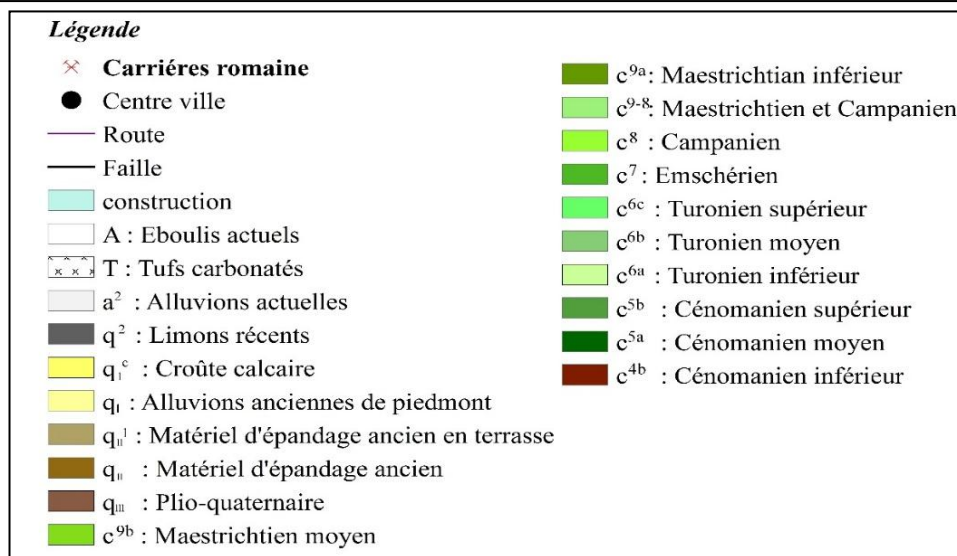
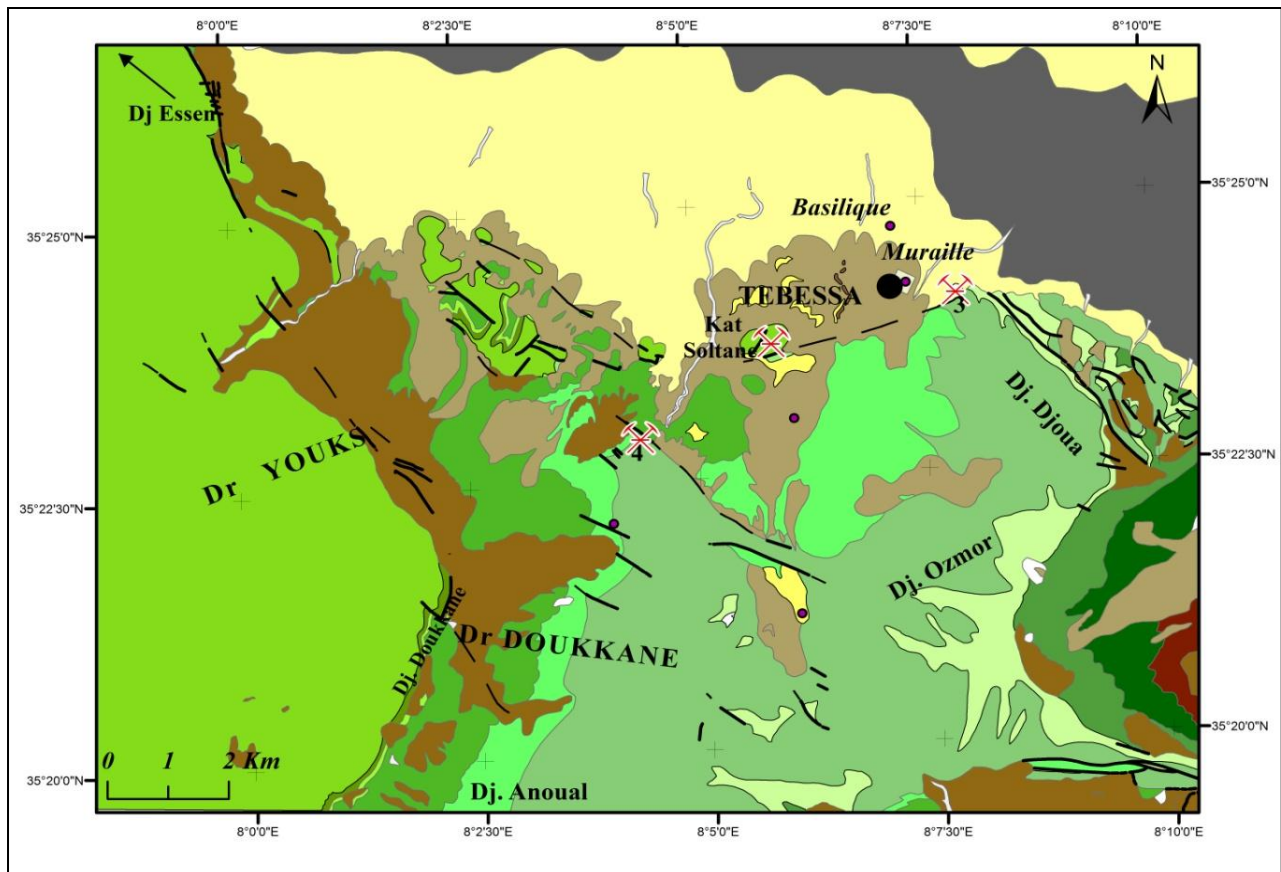


Figure 3.2 : Carte géologique de Tébessa et localisation des carrière d'extraction (Durozoy, 1953)

3. Echantillonnage et méthodes analytiques :

Pour l'échantillonnage sur site, une autorisation a été demandée auprès du ministère de la culture qui a accepté la demande pour un nombre d'échantillon limité et des dimensions ne dépassant pas 7 cm de profondeur et de 2,14 cm en diamètre. Quatre échantillons ont été prélevés sur quatre types de pierres au niveau de la muraille avec une carotteuse portative. Le choix des échantillons est basé sur les pierres les plus abondantes et les plus endommagées rencontrées au niveau de la muraille et de la basilique.

Par ailleurs, un échantillonnage au niveau des anciennes carrières romaines a été effectué (djebel Doukkane et Djebel Djoua) dans des parties saines non altérées.

Les autres types de pierres de sources non précises (Tufs carbonatées, calcaires beiges et calcaires crayeux) ont été soumis à une exploration sur la base de la carte géologique et de terrain (Fig. 3.2).

Les échantillons sélectionnés, au niveau des carrières et sur les sites historiques sont été profondément analysés par une étude pétrographique, pétrophysique et minéralogique.

3.1. Description pétrographique

Elle est basée sur :

- Une description macroscopique des échantillons sur des cassures fraîches,
- Une description microscopique des roches sédimentaires carbonatées au moyen d'un microscope optique polarisant. Les roches calcaires sont décrites selon la classification de Dunham (1962) pour leur texture et selon la classification de Choquette et Pray (1970) pour leur porosité.

Pour la classification pétrophysique (chapitre 4), les pores seront décrits conformément à la classification de Lucia (1995, 2007), il s'agit de la version modifiée de la classification de Choquette et Pray qui inclue la connectivité des pores.

3.2. Analyses minéralogiques :

Cette étude est effectuée pour l'identification et l'estimation des minéraux constitutifs des pierres sélectionnées et la distribution des éléments chimiques dans la roche. Pour cet effet, l'analyse minéralogique est réalisée par la diffraction des rayons X sur la poudre de granulométrie inférieure à 63 μm au niveau de laboratoire de pétrologie appliqué de l'université d'Alicante. L'appareillage utilisée est un diffractomètre Philips PW 1840, et les échantillons ont été passés au rayonnement Cu $K\alpha$ filtré au Ni ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) à 40 kv et 10 mA. La plage de balayage est de $2\theta = 1$ à 80° .

Cette analyse DRX est appuyée par l'observation au microscope électronique à balayage afin de cartographier les éléments chimiques dans la texture de la roche. L'appareillage utilisée est un Microscope électronique à balayage (SEM) JEOL JSM 6400 couplé à un spectromètre à dispersion d'énergie des rayons X. Les échantillons sont couverts à l'état brut par une fine pellicule d'or avec un voltage de 10 Kv.

4. Nature des matériaux de la muraille Romaine et de la Basilique

Les roches carbonatées, en l'occurrence les calcaires roses et les tufs carbonatés dans une moindre mesure sont les plus utilisées dans la construction de la muraille et la Basilique de Tébessa, à ces calcaires s'ajoute les calcaires crayeux et les calcaires beiges.

4.1. Les Calcaires roses :

4.1.1. Description macroscopique des calcaires roses de la carrière (Dj. Doukkane) :

La carrière qui a servi de source de pierres de tailles des sites historiques de Tébessa est celle situé au niveau de djebel Doukkane (35°22'38.41"N, 8° 4'2.82"E) (Planche 3.1 A). Il s'agit de calcaires en bancs d'épaisseur de 1 à 2m. Ils sont de couleur rosâtre, finement grenus avec des bioturbations très prononcées (Planche 3.1 C) et comprennent de nombreux fossiles visibles à l'œil nu tels que les sections de gastéropodes et des coquilles de bivalves entiers ou en débris. Les microfissures de ces roches sont remplies avec un matériel à dominance d'oxyde de fer.

4.1.2. Description macroscopique du calcaire rose de la muraille et de la Basilique :

Au niveau de la Muraille et de la basilique romaine de Tébessa (Planche 3.1 B), le calcaire rose est la principale pierre de construction qui est largement observée dans les monuments (Planche 3.1 D). Elle est utilisée comme pierre de taille dans les deux sites, ou sous forme d'autres éléments architectoniques (Colonnes, dalles...etc.) au niveau de la basilique. Les pierres de tailles utilisées sur les deux sites, ont des dimensions de 120 cm de longueur, 70 cm de largeur et 60 cm de hauteur. Il faut noter que les bancs inférieurs à 70 cm sont incompatibles avec les dimensions minimales requises au niveau des deux sites.

C'est un beau calcaire compact et dur qui est identique à celui observé dans la carrière. Il est de couleur rose, granulométrie fine et présence de bioturbations de couleur brune (coloration due aux oxydes de fer) et microfissuration. La porosité de la roche est assez importante et présente souvent des vacuoles millimétriques à plurimillimétrique à remplissages de cristaux

de calcite, dolomite et/ou d'oxydes de fer. Les bioturbations riches en oxydes de fer sont à composition dolomitique.

4.1.3. Description microscopique :

L'observation microscopique des calcaires roses a permis d'identifier les microfaciès suivants :

-Wackestones à Packstones à gastéropodes, débris de rudistes et lamellibranches parfois micritisés et perforés, des débris et spicules d'échinodermes (Planche 3.1E). Les gastéropodes sont recristallisés par des grains de calcite de taille variable allant de 80 μm à 200 μm et atteignant parfois 750 μm . Ce microfaciès présente une porosité vacuolaire, avec des remplissages micritiques et des cristaux de dolomite et des oxydes de fer en bordure des vides (Planche 3.1E). Les bioturbations sont composées de cristaux de dolomites automorphes (250 à 400 μm) à cœur ferrifère et zonation de croissance claires. C'est une dolomite unimodale Planaire "e" suivant la classification de Sibley et Gregg (1987), (Planche 3.1F).

-Wackestone à débris de lamellibranches recristallisé, gastéropodes, spicules d'échinodermes, ostracodes et rares millioles. L'intérieur des coquilles de Gastéropodes comprend des pellets et des cristaux de dolomite automorphe. C'est un microfaciès à porosité vacuolaire et fissurale, présentant des remplissages de type granulaire (Planche 3.1E). Les pyritoédres sont fréquents et se situent essentiellement en bordure des débris fossiles et en bordure des vides.

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

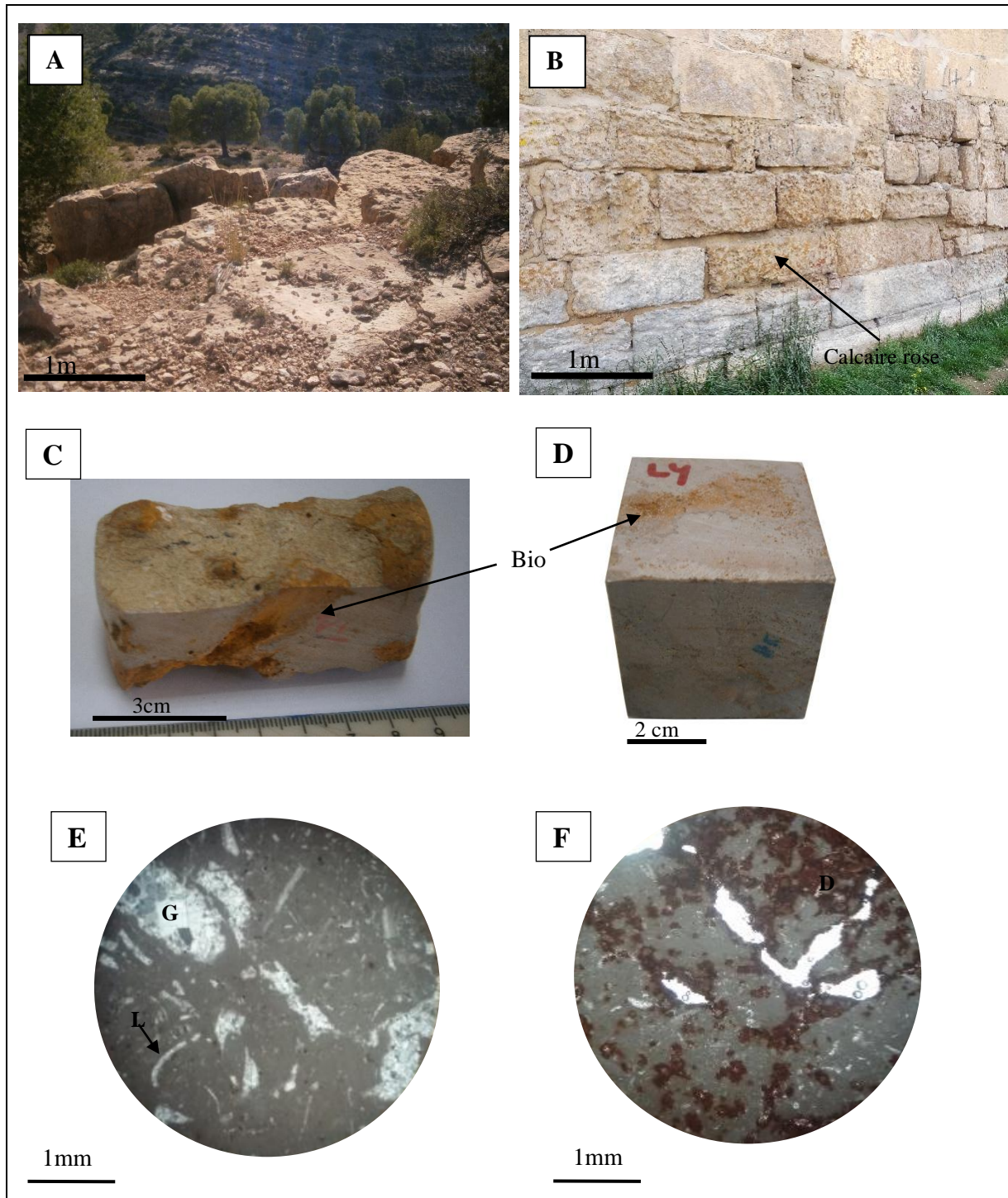


Planche 3. 1 : Vue panoramique des calcaires roses de la carrière de Dj. Doukkane (A) Calcaire rose de la muraille (B) Echantillons des calcaires roses issue de la carrière (C) et de la muraille (D). microfaciès des calcaires roses : wackestone-packstone à rudistes et lamellibranche (E) ; wackestone à gastéropodes et lamellibranche (F) ; Bio : bioturbation, G :gastéropode, L : lamellibranche, D : dolomite

4.2. Tufs carbonatés

4.2.1. Description des tufs carbonatés de la carrière (Dj Djoua) : ce type de faciès affleure au sud de la ville de Tébessa, à moins d'un Kilomètre à la base de Djebel Djoua (35°24'7.17"N, 8° 8'10.12"E) (Planche 3.2A). Ce djebel représente la carrière d'extraction la plus proche avec un type de pierre facilement taillable.

Ce type de pierre est observé uniquement au niveau de la muraille de Tébessa. Sur le plan macroscopique, c'est une roche carbonatée de couleur grise avec des débris de végétaux et d'escargots formés au niveau d'anciennes source d'eau fraîche (Planche 3.2C). La porosité est importante dans ce type de pierre et lui donne un aspect spongieux (Planche 3.2C). Elle présente des cavités de 2 à 8 cm. La faible cohésion des grains leur confère une faible résistance, mais leur structure massive leur donne la particularité d'être facilement utilisable par rapport aux dimensions demandées pour les pierres de taille.

4.2.2. Description macroscopique des Tufs carbonatés de la muraille

Le tuf carbonaté est utilisé uniquement au niveau de la muraille byzantine avec une centaine de blocs (Planche 3.2B). Ils présentent les mêmes caractéristiques que ceux de la carrière (Planche 3.2D).

4.2.3. Description microscopique des tufs carbonatés

Le tuf carbonaté de la muraille est représenté par un microfaciès essentiellement micritique représenté par des mattes algaires et des débris de végétaux (Planche 3.2E). La texture largement observée est une texture arborescente (Planche 3.2F), avec des rameaux anastomosés sous forme de Petits buissons. Ces mêmes figures sont observables dans les systèmes de tufs récemment formés (Garcia-Del-Cura et al., 2000; Santos et al., 2010; Garcia-Del-Cura et al., 2012).

Les autres textures observées, sont de type laminaire avec une macroporosité importante qui atteint parfois plusieurs centimètres. En effet les moules de plantes déposées lors de la formation de ce type de pierre sont responsables de la création des cavités et des macropores.

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

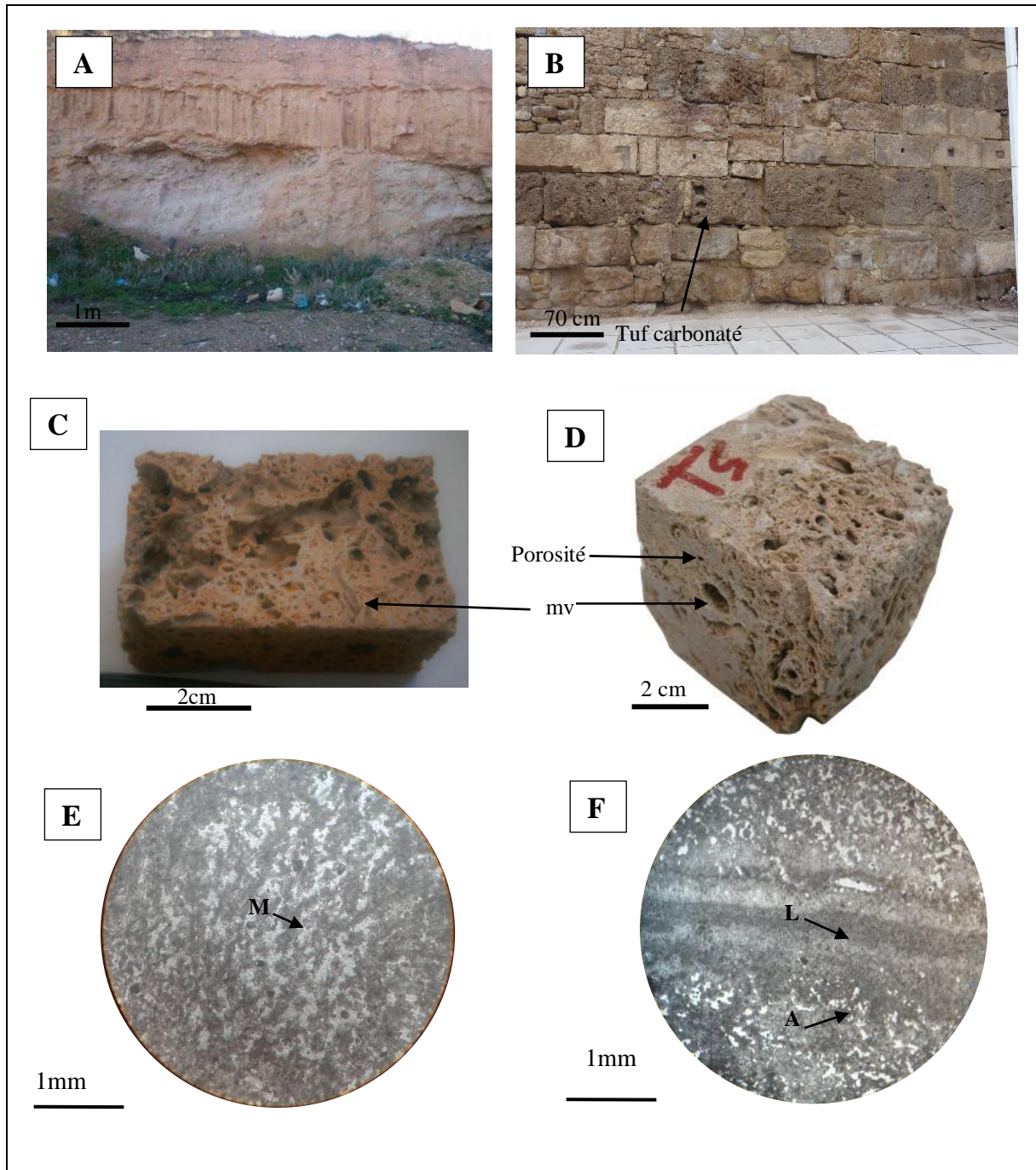


Planche 3. 2 : Vue panoramique des Tufs carbonatés de la carrière de Dj. Djoua (A) Tufs carbonaté de la muraille (B), Echantillons des tufs carbonatés issue de la carrière (C) et de la muraille (D). Microfaciès des tufs carbonatés essentiellement micritiques avec des mattes algaires (E) et une texture arborescente (F). M : matre algare, L : lamination, A : texture arborescente

4.3. Les Calcaires beiges

4.3.1. Description des calcaires beige de la carrière (Dj. Essen) :

Selon les données géologiques et les traces d'anciennes exploitations, la carrière de Djebel Essen semble être la source d'extraction de ce calcaire où les traces d'exploitation sont encore visibles (35°25'6.69"N, 7°54'12.54"E) (Planche 3.3A). Il s'agit d'un calcaire bioclastique en bancs décimétriques à la base du Turonien moyen et plurimétriques vers le haut de cet étage (Planche 3.3C). Ils sont de couleur beige, riches en bivalves et gastéropodes. Ils sont finement grenus et présentent des microfracturations à remplissage calcitique.

4.3.2. Description macroscopique des calcaires beige de la muraille :

Les calcaires beiges de la muraille correspondent parfaitement à ceux observés dans la carrière de djebel Essen (Planche 3.3B). C'est un calcaire bioclastique dur et de couleur beige (Planche 3.3D). Les fossiles observés sont des rudistes et lamelibranches. C'est un calcaire cristallin avec des cristaux bien visible à l'œil nu.

Ce calcaire est utilisé en générale au niveau de l'arc de triomphe Caracalla et à ses alentours.

4.3.3. Description microscopique des calcaires beiges :

Il s'agit d'un grainstone (Planche 3.3E) à bioclastes micritisés et microbrèches micritiques, et parfois recristallisés. Ce microfaciès est riche en cristaux de dolomites automorphes à cœur oxydé et à zonation de croissance limpide. La porosité de ce microfaciès est importante et se présentent soit sous forme de « vuggy », soit sous forme fissurale d'après la classification de Choquette et Pray (1970). La taille des pores et des fissures est millimétrique à pluri-millimétrique.

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

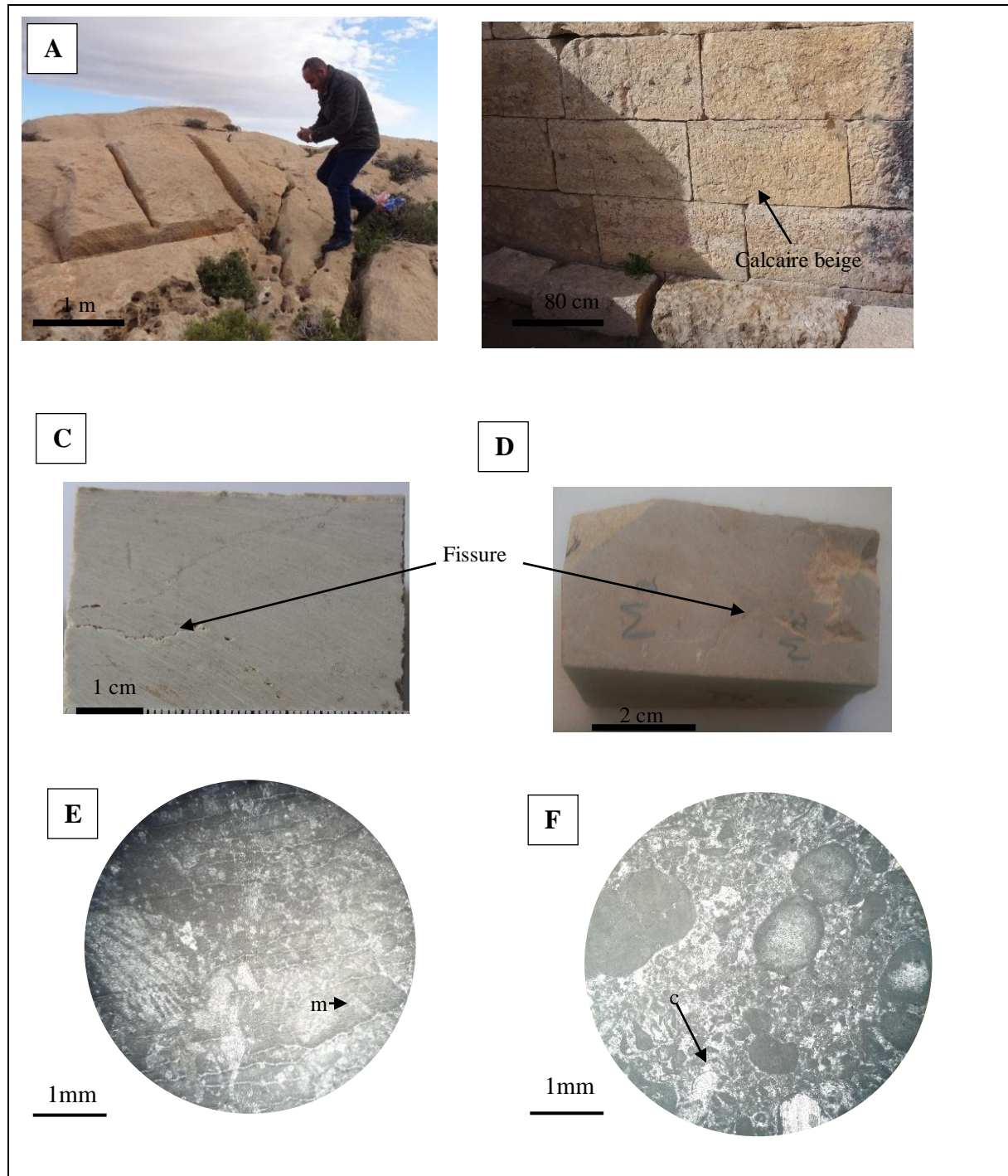


Planche 3. 3 : Vue panoramique des calcaire beige de la carrière Essene avec des traces de taille (A) et des calcaires beige de la muraille (B) échantillon d'un calcaire beige de la carrière (c) de la muraille (D). Un microfaciès à grainstone et à microbrèches micritiques (E) , et observation des grainstone à coraux (F). m : microbrèche, c : coraux

4.4. Calcaires crayeux

4.4.1. Description des calcaires crayeux de la carrière (Djebel K^{at} Soltane) :

Aux alentours de la muraille byzantine là où ce calcaire est utilisé, le gisement probable est celui qui se trouve au niveau de Djebel K^{at} Soltane (35°23'40.94"N, 8°5'46.69"E) (Durozoy 1953). La zone où se trouve cet affleurement est totalement couverte par les constructions.

Il s'agit de calcaire du Campanien inférieur en bancs pluridécimétrique. Il est de couleur blanche, d'aspect crayeux, moyennement grenu, sans fossiles apparents, de porosité moyenne et moyennement dure.

4.4.2. Description macroscopique des calcaires crayeux de la muraille

Ce type de pierre a rarement été utilisé, il n'existe qu'une douzaine de blocs sur la façade Sud de la muraille Byzantine (Planche 3.3B). Cette pierre est un calcaire gris clair à blanc d'aspect crayeux, sans macrofossiles apparent, avec une granulométrie fine à moyenne et une porosité plus ou moins importante (Planche 3.3D).

4.4.3. Description microscopique des calcaires crayeux :

Il s'agit d'un calcaire à wackestone. La microfaune est présente avec des ostracodes et des foraminifères tels que Nodosariidae et de très petits Triloculina (Planche 3.3E et F). Les globigérines présentent des cristaux de glauconie et de phosphate

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

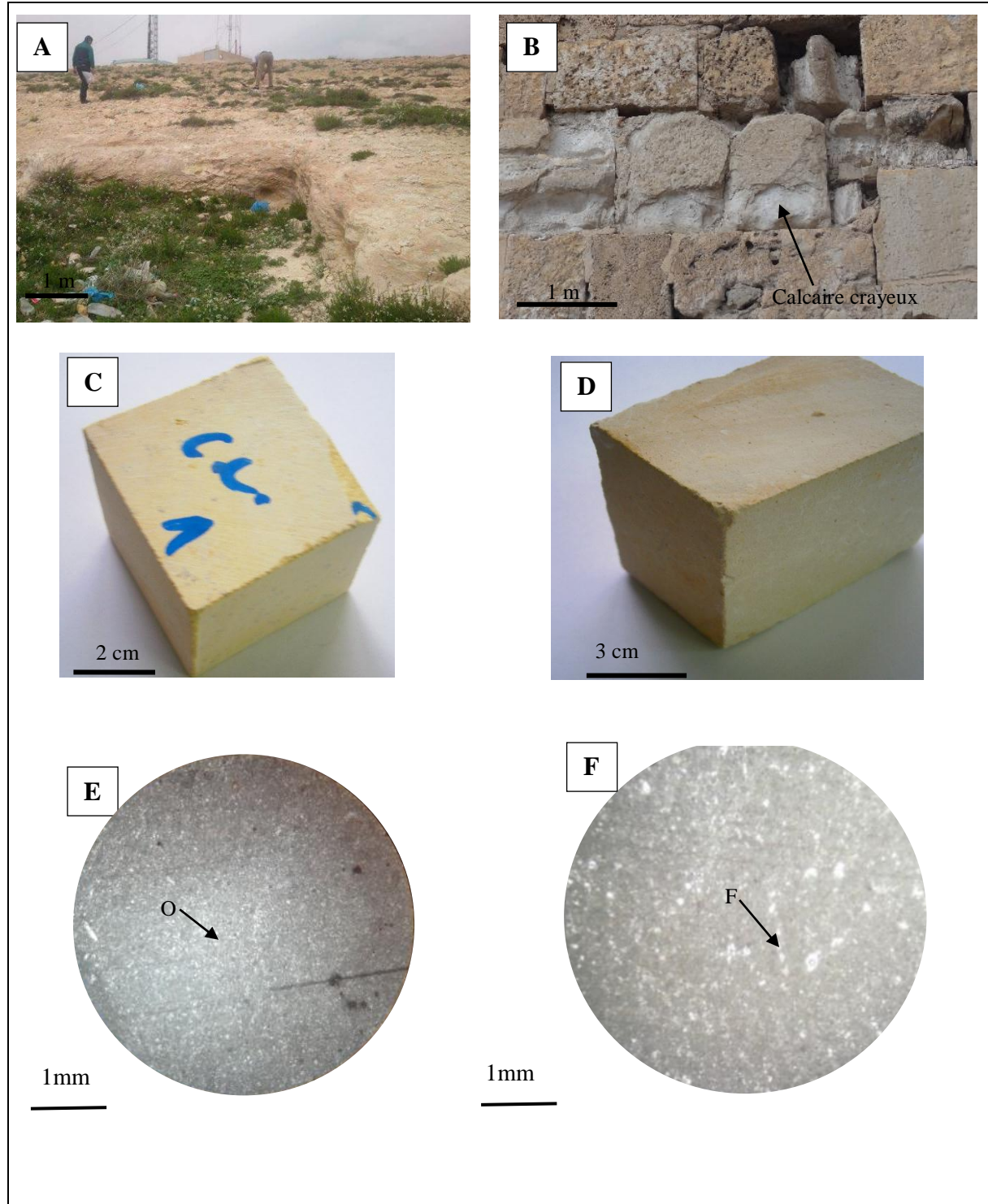


Planche 3. 4 : Vue panoramique des calcaires crayeux de la carrière de Dj. Kat Soltane (A) et au niveau de la muraille (B) échantillons d'un calcaire crayeux issue de la carrière (C) et un échantillon issue de la muraille (D). Un microfaciès à wackstone à ostracode (E) et riche en foraminifères (F), O : Ostracode, F : Foraminifère,

4.5. Les autres types de roches :

Elles ont été utilisées au niveau de la basilique et les lieux de leur extraction ne se trouvent pas dans l'environnement immédiat de la ville de Tébessa. Nous nous contenterons de décrire ces roches sur le plan macroscopique :

- **Le Marbre**

C'est un marbre cristallin blanc à texture rubanée (blanc et gris). Ce type de pierre est utilisé uniquement au niveau de la Basilique Romaine en tant que colonne (Figure 3.7A). C'est un marbre finement à moyennement grenu et ressemble au type appelé « greco-scritto » classiquement supposé provenant de la région d'Annaba, en Algérie (Blas de Roblès et Sintès, 2003). Ce marbre a une structure formée généralement par une intercalation de lits blancs de calcite souvent bien orientés et présente des veines bien distribuées dans la masse carbonatée.

- **Brèche**

Ce type de pierre est utilisé comme colonne. La roche est constituée d'éléments bréchiques anguleux de taille centimétrique à pluri-centimétrique d'onyx de couleur blanc jaunâtre (Figure 3.7B). Ces éléments sont affectés par un réseau de fissuration et cimentés par des argiles de couleur rougeâtre.

- **Granite**

C'est un type de pierre qui est utilisée au niveau de la Basilique Romaine comme colonne et qui est un microgranite à biotite de couleur blanchâtre et à texture microgrenue (Figure 3.3C). Cette roche est affectée par de fines fissures et de petits pores remplis par des oxydes de fer.

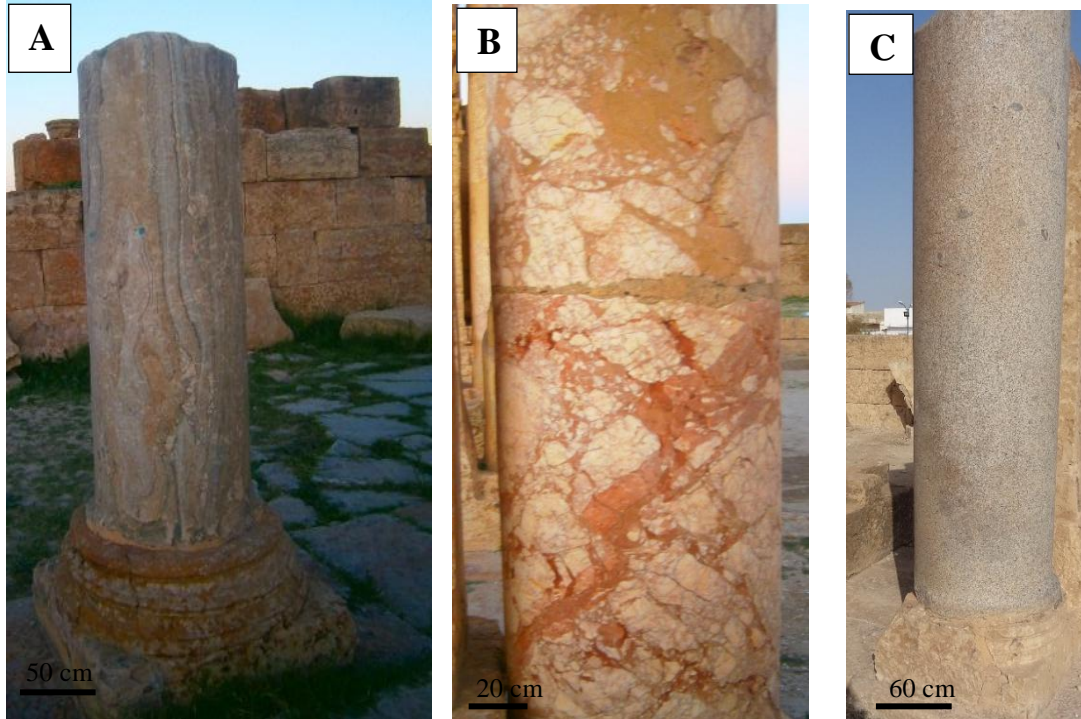


Fig. 3.3 : Différent types de roches observées au niveau de la Basilique Romaine tels que le Marbre (A) Brèche (B) et Granite (C)

5. Environnement de dépôt des roches carbonatées

La description microscopique et la détermination des différents microfaciès a permis de définir le milieu de dépôt des différentes pierres de taille des monuments.

- La pierre de taille dominante est le calcaire rose, celui-ci présente des microfaciès typiques d'un milieu de plateforme, peu profond situé à proximité de la barrière et appartenant au milieu intertidal à supratidal dans certains cas. En effet, la position des bioclastes en stratification oblique ainsi que les variétés fossiles reconnues (lamellibranches, rudiste et coraux) indiquent un milieu d'avant barrière soumis à l'action des vagues avec une énergie forte par intermittence. Les gastéropodes, les millioles et les pellets seraient beaucoup plus représentatifs du milieu intertidal à supratidal.

Les environnements marins peu profonds modernes sont particulièrement sensibles à la destruction de la porosité par cimentation en raison des niveaux élevés de sursaturation des eaux marines par rapport aux minéraux carbonatés métastables (Clyde et al., 2013). Les phénomènes diagenétiques sont représentés par les différentes recristallisations observées dans les coquilles de gastéropodes et les pores, il s'agit d'une diagénèse précoce avec une cimentation en milieu vadose-météorique (Zidi et al., 2019).

La dolomite planaire « e » développée dans un milieu micritique montre une cimentation granulaire qui appartient également à un milieu vadose continental.

- Les calcaires beiges se sont formés sur une pente proche d'une barrière avec des microbrèches micritiques et recristallisées, des débris de coraux et des débris de rudistes. Les éléments sont cimentés par de la calcite granulaire et des cristaux de dolomite automorphes.

Les calcaires crayeux appartiennent à un milieu de sédimentation hémipélagique comme les montres les foraminifères pélagiques et la présence de cristaux de glauconie.

- Durant les processus diagenétiques, la porosité primaire est perdue au gré de la porosité secondaire par des processus interrelié tels que la fracturation, la dissolution, la dolomitisation (Moore, 1989). La bioturbation qui est présente dans ce type de roche est très abondante est représenté par une dolomitisation importante associée à des oxydes de fer.

- La fracturation en relation avec les événements tectoniques qui ont touché la région de Tébessa est un autre processus qui contribue avec la porosité à jouer un rôle important dans la perméabilité de la roche.

- Les tufs carbonatés sont connus pour leur développement dans un milieu continental près de sources froides avec une accumulation importante de débris végétaux.

Les différents milieux de formations de ces roches auront une influence certaine sur les différentes altérations qui ont affecté les pierres de taille comme cela sera démontré dans le chapitre 5 et 6.

6. Minéralogie des pierres de taille : elle a été effectuée uniquement sur les pierres de taille calcaire rose et tuf carbonaté.

6.1. Le calcaire rose :

Les résultats obtenus par le diffractomètre des rayons X sur le calcaire ont montré que la calcite constitue la phase principale de cette pierre tandis que les phases minérales secondaires sont représentées par la dolomite, la goethite et le quartz.

La taille et la forme des grains sont très diversifiées dans ce type de calcaire. On observe de gros grains de calcite (Figure 3.4). Des grains recristallisés de calcite de grande dimension qui se développent dans les vides sont observé aussi avec des rayons de 80 μm à 200 μm et qui peuvent atteindre 750 μm (c. f. Planche 3.1 E). Les oxydes de fer s'observent localement dans la porosité (Figure 3.4), en plus de la présence d'argile décelée au niveau des fissures et des pores. Les fissures observées sous SEM sont de différentes épaisseurs et sans orientation

préférentiels, de taille inférieure à 200 μm (Figure 3.4). Les observations montrent que la porosité est plus importante au niveau des surfaces bioturbées avec des diamètres atteignant 200 μm (Figure 3.5) tandis que les autres parties de la pierre non-bioturbées ont des rayons inférieurs à 10 μm .

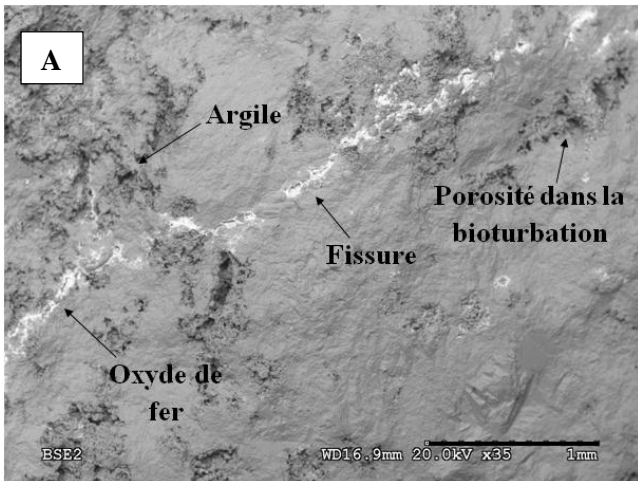


Figure 3.4 : Minéralogie de caillasse observée sous SEM

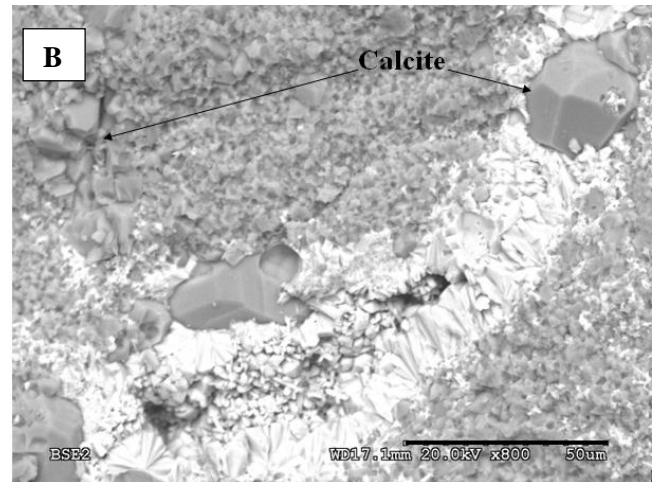


Figure 3.5 : Observation de la taille des cristaux de calcite recristallisés

La cartographie élémentaire (EDX) d'un échantillon de calcaire montre que le signal du calcium (Planche 3.5 B) est représenté par des grains qui sont principalement de la calcite, de la calcite recristallisée, et des bioclastes. Les signaux de silicium (Planche 3.5 C) et de fer (Planche 3.5 D) confirment l'observation par microscopie optique pour l'identification de la dolomite, quartz et goethite. En effet, les observations sous EDX montrent que les oxydes de fer se trouvent tapissés dans les parois des vides ou aux alentours de la porosité, tandis que le quartz se localise dans la matrice indépendamment de la porosité.

La présence d'aluminium (Planche 3.5 E) dans la porosité permet de confirmer la présence des argiles et occupant les pores.

6.2. Le tuf carbonaté :

Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X (DRX) sur les échantillons de tuf carbonaté sain indiquent que la calcite est le minéral principal constituant ce type de pierre. Ces données sont appuyées par les observations de Microscope électronique à balayage (SEM). En effet sous SEM (Fig. 3.6 et Fig. 3.7), les cristaux de calcite ont un diamètre qui atteint les 50 μm et où certains grains de calcite semblent être détachés et isolés. L'observation à l'échelle microscopique montre la faible cohésion entre les grains. Ces cristaux de calcite suivent une certaine direction et semblent disposés en lamines dû au processus de leurs formations.

CHAPITRE 3 : GEOLOGIE ET ORIGINE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Les observations obtenues sous le microscope électronique à balayage montrent que les tufs présentent de larges pores de 500µm (Fig. 3.7).

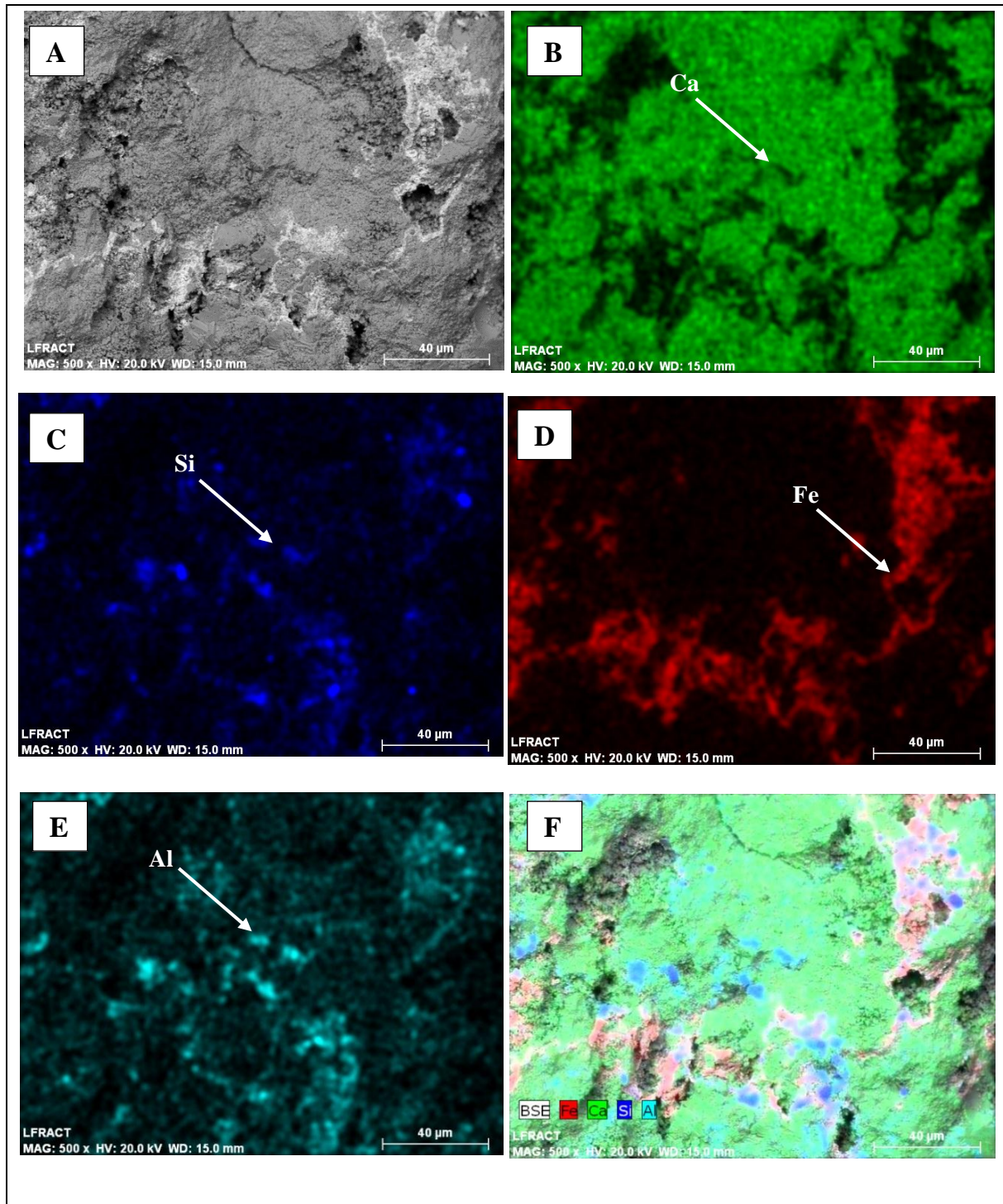


Planche 3. 5 : Cartographie élémentaire par analyse EDX sur une surface de calcaire sain (A) avec la distrucbtion des éléments chimiques tels que le : Ca : calcium (B), Si :silicium (C), Fe : fer (D), Al : aluminium (E) et distribution de tous les éléments chimiques sur une surface saine (F).

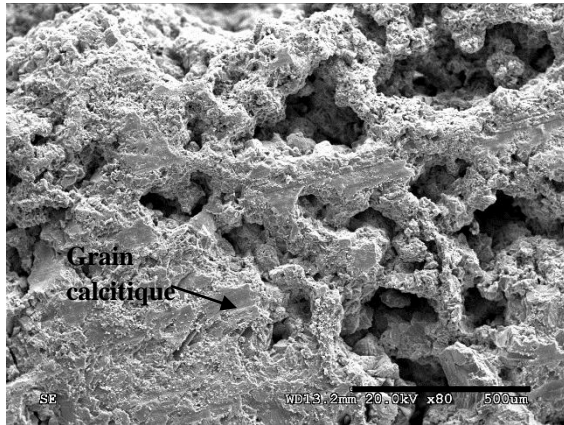


Figure 3. 6 : Observation de la disposition des grains sur une surface de Tuf sous SEM

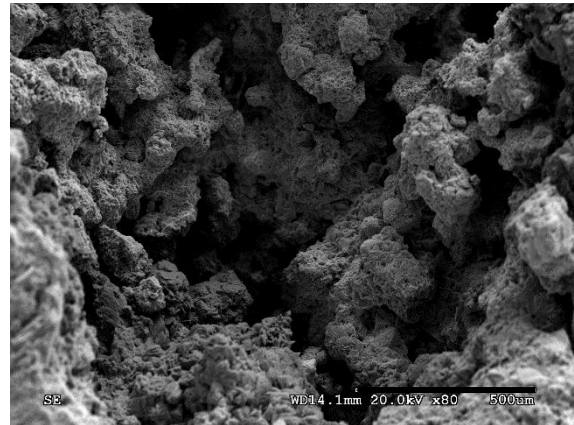


Figure 3. 7 : Observation de la cohésion des grains dans les pores sous SEM

7. Conclusion :

Les pierres de tailles utilisées au niveau de la muraille byzantine à Tébessa et de la basilique sont essentiellement carbonatées. Les calcaires roses du Turonien moyen trouvent leurs origines dans le Djebel Doukkane où leurs microfaciès sont des Wackestone à Packstones. Les calcaires roses présentent une porosité intercrystalline qui est liée aux surfaces des fissures et des bioturbations. Par contre les tufs carbonatés sont extraits à la base Nord de Djebel Djoua qui sont formés durant le Quaternaire. En ce qui concerne les tufs carbonatés, la macroporosité est très importante du côté des cavités.

Sur le plan minéralogique, la calcite est le minérale principale pour les deux types de pierres où la minéralogie secondaire de calcaire rose est constituée par la goethite, quartz et dolomite. Les bioturbations des calcaires sont riches en oxydes de fer qui sont exhibé par leurs couleurs avec la présence des cristaux de dolomite. Au niveau des fissures, des particules argileuses sont présentes aux cotés des oxydes de fer avec des gros cristaux de calcite recristallisée.

Chapitre 4 : Caractéristiques des matériaux des carrières

1. Introduction

Depuis les temps anciens les roches sont utilisées pour la construction des monuments soit comme bâti ou grotte. Ces roches doivent répondre à certaines caractéristiques de durabilité et de résistance. Comme tous les matériaux de construction, les propriétés physiques et mécaniques doivent être connues pour qu'on puisse prédire leurs comportements *in service*. Les paramètres qui influencent la durabilité et la résistance tels que la masse volumique, porosité totale, porosité ouverte, porosité connectés, distribution des rayons porales, propriété d'absorption capillaire, vitesse des ondes ultrasoniques, résistance mécanique, propriétés texturales sont profondément discutés dans ce chapitre.

2. Masse volumique sec et masse volumique saturé

2.1. Définition

La masse volumique sec d'une roche (ρ_{sec}) est la mesure de la masse sèche de la roche contenue dans une unité de volume ($\rho_{sec} = \text{masse/volume}$). Elle est généralement exprimée en g/cm^3 . La masse volumique saturé (ρ_{sat}) des grains solides est le rapport de la masse des grains solides sur leur volume. Cette dernière tient en compte seulement les grains solides qui la forment et ne tient pas en compte des vides. Elle donne des informations sur la composition de matériau (nature minéralogique et altération). La plupart des roches sont poreuses et la masse volumique totale des roches poreuses dépend non seulement de la densité de la matrice solide de matériaux, mais aussi de la densité des fluides contenues dans la porosité et de leurs saturations. Comme l'indique l'équation suivante (Suping Peng et Jincai Zhang, 2007) :

$$\rho_{sec} = (1 - \emptyset)\rho_{matr} + \emptyset\rho_{fluid}$$

Où : \emptyset : Porosité de la roche

ρ_{sec} : Masse volumique sèche

ρ_{fluid} : Masse volumique de fluide

$\rho_{matrice}$: Masse volumique de la matrice rocheuse

2.2. Protocole

2.2.1. Masse volumique sec

La mesure de la masse volumique sèche et saturée est effectuée selon la norme NF P 94-410-2 (2001). La mesure de ces paramètres a été effectuée sur des échantillons coupés de forme cubique avec des dimensions de (40*40*40mm) et d'autre de (50*50*50 mm). Le nombre d'échantillons mesurés est de 12 pour les tufs carbonatés et de 10 pour les calcaires roses.

Les échantillons sont chauffés à l'étuve à 60°C pendant 24 heures pour séchage, puis pesées (M_{sec}) après leur refroidissement. Le volume des échantillons est calculé par l'équation $v=a*b*c$. De ce fait la masse volumique sèche est calculée par l'équation suivante :

$$\rho_{sec} = + \frac{Ms}{a*b*c} * 1000$$

D'où :

a : longueur de l'échantillon en cm,

b : largeur de l'échantillon en cm

c : hauteur de l'échantillon en cm

ρ_{sec} : masse volumique sèche

Ms : masse sèche de l'échantillon en g

2.2.2. Masse volumique saturée

Les échantillons séchés ont été pesés et placés dans une chambre à vide à 20 ± 7 mbar de pression contrôlée par un manomètre à vide. Parallèlement, dans une seconde enceinte reliée à la première, de l'eau distillée est désaérée pendant 6 heures (Figure 4.1). Ensuite, l'eau est admise dans la première enceinte où l'imbibition sous vide des éprouvettes a lieu. Le niveau d'eau est ajusté de sorte qu'il ne dépasse jamais la frange capillaire. Les éprouvettes restent alors immergées pendant une journée supplémentaire. Ensuite, une pesée hydrostatique des éprouvettes saturées immergées dans l'eau (M_{hyd}) est effectuée ainsi qu'une pesée à l'air libre des échantillons saturés essuyés avec un chiffon humide (M_{sat}). La densité de l'eau étant égale à 0,998. Cette méthode ne considère pas les pores fermés inaccessibles lors de la phase de saturation. La masse volumique saturée (densité de squelette solide) des échantillons est calculée de la façon suivante :

$$\rho_{sat} = + \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{hydro}} * 0,998$$

Où :

ρ_{sat} : Masse volumique saturé,

M_{sec} : Masse de l'échantillon sec,

M_{hydro} : Masse hydrostatique de l'échantillon saturé dans l'eau,

M_{sat} : Masse saturé a l'aire libre,

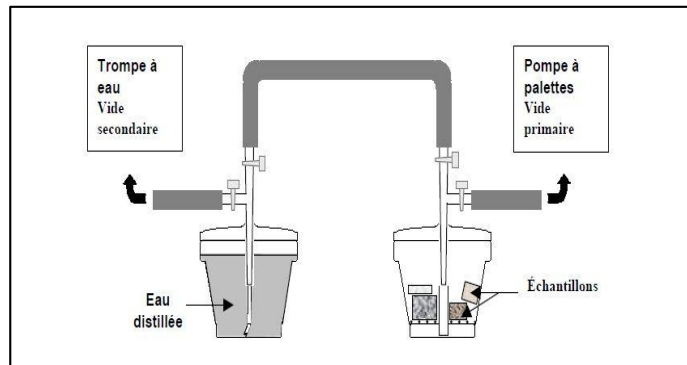


Figure 4. 1 : Schéma du dispositif expérimental de porosité totale à l'eau sous vide (Rousset Tournier, 2001)

2.3. Résultats

Les résultats obtenus pour les masses volumiques sèches et les masses volumiques saturées de ces roches (calcaires roses et tuf carbonaté) étudiées sont reportés dans le tableau 4.1 et le tableau 4.2.

La masse volumique sec (ρ_{sec}) du calcaire rose (L) étudié est de $2.54 \pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ qui varie légèrement par rapport à ça masse volumique saturé d'une valeur moyenne de $2.58 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$. Cette variation est expliquée par certaines propriétés texturales liée à la roche elle-même qui peuvent influencer la valeur de la masse volumique sèche du calcaire rose telles que les fissures et les pores observer macroscopiquement. Selon Siegesmund et Dürrast (2011), la similitude de la masse volumique sèche et de la masse volumique saturée est due principalement à la faible porosité de la roche. Pour cela, la valeur de la masse volumique sèche reflète la densité de la phase solide. La masse volumique d'une roche donnée traduit généralement l'état d'altération et de dégradation. Pour le cas d'un granite sain, ça masse volumique peut aller jusqu'à 2,7-2,8, d'où l'état altéré peut diminuer à 2,4-2,5 (Price, 1995).

Le tuf carbonaté (T) quant à lui à une masse volumique sèche moyenne de $1,24 \pm 0,19 \text{ g/cm}^3$ qui varie par rapport à ça masse volumique saturé d'une valeur de $1.47 \pm 0.12 \text{ g/cm}^3$. Cette variation des deux paramètres est due principalement au réseau poral important de cette roche observée macroscopiquement. Le minéral principal de ce matériau est la calcite mais la roche présente une masse volumique saturée de $1.47 \pm 0.12 \text{ g/cm}^3$ inférieur de celle de la calcite. Cette différence de valeur reflète l'importance et la complexité de réseau poral de tuf. Selon Siegesmund et Dürrast (2011), la masse volumique est étroitement liée à la porosité, cette liaison est montrée dans le cas des tufs carbonatés qui présentent une faible masse volumique.

Tableau 4.1 : Masse volumique sèche et masse volumique saturée des tufs carbonatés

Echan	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
ρ_{sec}	1,04	1,17	1,27	1,38	1,34	1,13	1,42	0,87	1,47	1,06	1,34	1,47
ρ_{sat}	1,28	1,41	1,54	1,62	1,57	1,43	1,6	1,17	1,76	1,31	1,62	1,73

Tableau 4.2 : Masse volumique sèche et masse volumique saturée des calcaires roses

Echan	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
ρ_{sec}	2,55	2,52	2,51	2,50	2,55	2,56	2,52	2,56	2,53	2,58
ρ_{sat}	2,59	2,56	2,57	2,56	2,6	2,6	2,57	2,60	2,58	2,50

3. Porosité

3.1. Porosité totale et porosité ouverte

3.1.1. Définition

La porosité d'une roche (ϕ) est définie comme le rapport du volume de vide (V_{vide}) sur le volume total de la roche (V_{total}). Cette grandeur est exprimée en pourcentage :

$$\phi = \frac{V_{vide}}{V_{total}} * 100 \text{ où : } v$$

Le milieu poreux est défini comme l'ensemble des espaces qui ne sont pas occupés par des éléments minéraux. Il apparaît donc comme un milieu continu et irrégulier formé de pores qui représentent des espaces inter ou intra-granulaires, dont les limites géométriques sont difficiles à préciser car, irréguliers dans leur taille et dans leur forme, ils communiquent entre eux par des interconnexions plus ou moins larges. Il y'a différents types de porosité :

Porosité totale et porosité ouverte.

Porosité Totale (ϕ_T) : La porosité totale comprend tous les vides accessibles ou non aux fluides et au gaz dans la roche tels que les pores isolés et non connecté.

La porosité ouverte (Réelle) ϕ_o : La porosité ouverte est définie comme la porosité accessible aux fluides principalement l'eau et aux gaz sous pression atmosphérique. L'imbibition étant réalisée en l'absence de l'air et de tout autre gaz.

3.1.2. Protocole opératoire de mesure de la porosité :

Les mesures de porosité totale à l'eau ont été faites selon les normes RILEM (essai n°I.1, 1978). Le nombre d'échantillons mesurés pour la porosité totale et ouverte est de 12 pour les tufs carbonatés et de 10 pour les calcaires roses.

Les calcaires roses étudiés et les tufs carbonatés sont constitués en majorité à plus de 94% par de la calcite de densité égale à 2.7. La porosité totale est calculée selon l'équation suivante :

$$\phi_T = \left(1 - \frac{\rho_{sec}}{2,7}\right) * 100$$

La porosité réelle ouverte : est calculée par l'équation suivante :

$$\phi_O = ((M_{sat} - M_{dry}) / (M_{sat} - M_{hydr})) * 100$$

3.1.3. Résultats

Les résultats de la porosité totale (ϕ_T) et ouvertes (ϕ_O) des échantillons de calcaire rose (L) et de Tuf carbonaté (T) sont montrés dans le tableau 4.3 et tableau 4.4.

La porosité totale moyenne de calcaire rose est de 6.23 ± 0.83 % ce qui fait de lui un matériau très peu poreux, compacte et dense, et ça été montré par sa masse volumique saturé qui est de 2.54 ± 0.03 . La porosité ouverte moyenne accessible à l'eau est de 4.48 ± 1.02 % qui reflète la compacité de la roche et le taux de pore accessible à l'eau. La faible différence entre la porosité totale et la porosité ouverte montre l'absence de macropores et qui est expliqué par la présence de certaines fissures présente dans ce type de calcaire rose.

Pour le tuf carbonaté, la porosité totale des échantillons mesurés a une valeur moyenne de 54.82 ± 4.88 % qui classe cette pierre dans les roches très poreuses et légères. On ce qui concerne la porosité ouverte accessible à l'eau, la valeur moyenne est de $44.37 \pm 2.5\%$. La différence élevée de la valeur entre la porosité totale par rapport à la porosité ouverte reflète une présence importante de macropores dans ce tuf qui est montré par ça faible masse volumique saturé de 1.47 ± 0.12 g/cm³.

Tableau 4.3 : Porosité total et ouverte des tufs carbonatés

E	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	moy
ϕ_T	61,62	56,72	52,84	48,96	50,48	58,33	47,67	67,92	45,55	60,58	50,47	45,63	54,82
ϕ_O	47,44	45,46	45,92	42,38	40,6	44,44	39,31	54,1	33,11	49,817	38,45	33,76	44,37

Tableau 4.4 : Porosité total et ouverte des calcaires

Echan	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	moy
ϕ_T (%)	5,45	6,67	6,95	7,25	5,69	5,36	6,71	5,04	6,29	4,49	6,23
ϕ_O	3,49	5,74	5,27	5,14	3,42	3,82	2,91	3,50	4,776	2,24	4,48

Selon la classification développée par Moos and Quervain (1948) en utilisant la porosité ouverte, le calcaire rose étudié présente une faible porosité ouverte qui est comprise entre 2,24 et 5,74 % ; en ce qui concerne les tufs carbonatés, ils sont très poreux selon cette classification qui présente un taux supérieur à 20%.

3.2. Porosimétrie au mercure (MIP)

Selon les auteurs et les méthodes utilisées, les classifications de la porosité en fonction de la taille des pores sont très nombreuses car les limites entre les domaines dits microporeux et macroporeux varient et sont souvent arbitraires (Beck, 2006). Cardell et al. (2003) définit les intervalles de porosité selon les forces influençant le mouvement des fluides à travers le milieu poreux : (i) l'infroporosité quand la taille des pores sont inférieures à 0,01 μm où les mouvements du fluide sont causés par les forces d'adsorption ; (ii) la supraporosité quand la taille du pore est supérieure à 2500 μm où la mobilité du fluide est gouverné par les forces gravitationnelles ; et (iii) la porosité capillaire entre 0,01 et 2500 μm où les mouvements de l'eau sont dus aux forces capillaires (Figure 4.2). Dans ce dernier intervalle dans lequel se situent les distributions porales de la plupart des pierres sédimentaires, on peut faire plusieurs subdivisions pour définir les domaines micro et macroporeux pratiques (Figure I.39), pour cette étude la classification de Beck (2006) a été choisie :

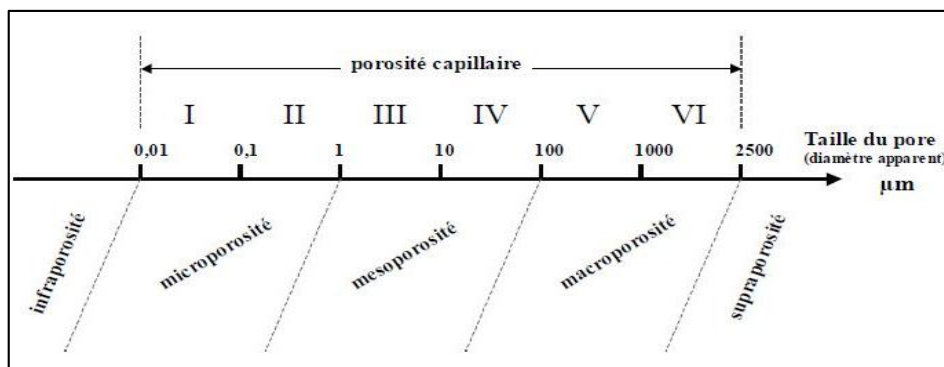


Figure 4.2 : Seuils de classe de porosité choisis pour cette étude (Beck, 2007)

3.2.1. Principe

La porosimétrie au mercure repose sur l'injection de mercure à une pression donnée dans une enceinte initialement sous vide contenant un solide poreux. La première goutte de mercure qui arrive dans l'enceinte est aussitôt vaporisée. L'enceinte et le milieu poreux de l'éprouvette se trouvent donc à la pression de vapeur saturante du mercure tant que la vapeur de mercure, fluide mouillant ($\theta < 90^\circ$), occupe le réseau poreux. Le mercure est ensuite introduit jusqu'à ce qu'il occupe tout l'espace accessible à une pression de l'ordre de 0.003

MPa. Par application de pressions croissantes sur le mercure liquide, fluide non-mouillant ($\theta > 90^\circ$), celui-ci envahit progressivement le milieu poreux ; le mercure liquide est en équilibre avec sa vapeur pour chaque valeur de pression appliquée. A chaque application de pression, l'équilibre est établi par résorption de la vapeur dans le mercure liquide.

Le principe de cette technique repose sur la relation établie à partir de la loi des pressions capillaires de LAPLACE (1806) et de l'équation de YOUNG qui détermine les angles de contact entre 3 phases non miscibles. En assimilant le rayon de pore à celui des ménisques, on peut exprimer la pression capillaire par une relation inversement proportionnelle au rayon porale :

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{R}$$

Avec :

θ : angle de raccordement mercure-vapeur de mercure à la surface minérale (en pratique : $\theta = 140^\circ$)

σ : tension superficielle du mercure (0,486 N/m à 25°C)

R : rayon de pore

P : pression d'injection (en pratique : $P \text{ (bar)} = 7,5 / R \text{ (\mu m)}$)

La pression capillaire, définie comme la différence de pression entre le fluide mouillant et le fluide non-mouillant, de part et d'autre des ménisques, est pour le mercure :

- $P_c = P_{Hg} - P_{vap}$

La pression de vapeur du mercure ne pouvant dépasser la pression de vapeur saturante du mercure qui est de 0,002 Torr (= 2,6 Pa) à température ambiante (25°C), on peut égaler la pression capillaire à la pression de mercure liquide injecté.

- $P_c = P_{Hg}$

Ainsi correspondra à chaque pression un rayon d'accès de pore. On obtient en remplaçant les constantes de l'équation, la relation suivante :

- $P_{Hg} \text{ (bar)} = 7.5 / r \text{ (\mu m)}$

L'invasion d'un pore, même de grande taille, est donc contrôlée par la pression nécessaire pour franchir le rétrécissement qui y donne accès. Ainsi chaque pression appliquée correspond à la pression contrôlée par le rétrécissement qui donne accès à un volume poreux donné. La saturation en mercure liquide du milieu poreux est d'autant plus grande que la pression est

forte. Cette méthode permet d'estimer la porosité totale et la répartition des rayons d'accès aux pores progressivement saturés en mercure (Figure 4.3).

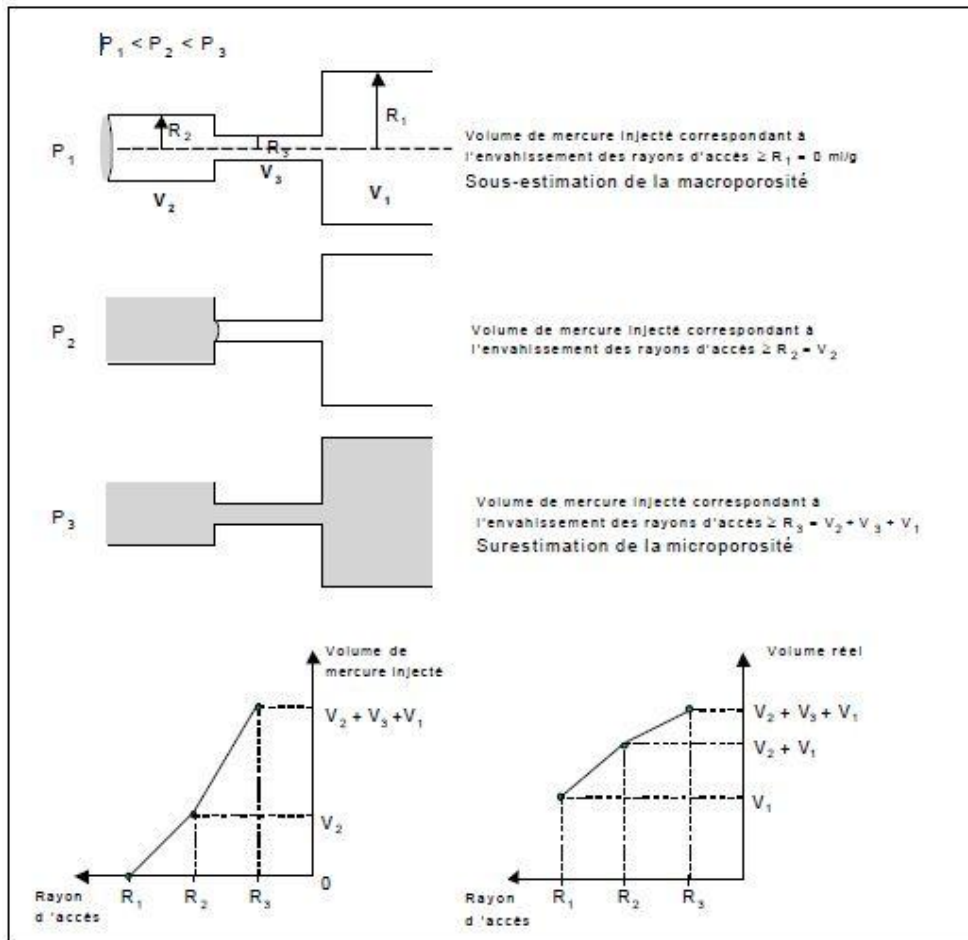


Figure 4.3 : Schéma explicatif de la notion de rayon d'accès de pores d'une injection de mercure (Beck, 2007)

3.2.2. Appareillage

La porosimétrie au mercure a été réalisée sur un appareil MICROMERITICS Autopore IV 9500 pouvant couvrir approximativement des accès aux pores compris entre 0.002 et 200 μm soit des pressions allant de 0.001 à 207 MPa. La mesure s'opère en deux temps : la mesure basse pression (0,001-0,150 MPa) réalisée manuellement, et la mesure haute pression (0,150-207 MPa) réalisée automatiquement. Cet essai a été effectué sur un échantillon de calcaire rose et un autre échantillon de tuf carbonaté sains d'un volume de 1 cm^3 chacun.

3.2.3. Résultats

La distribution et le volume des pores avec un rayon d'accès qui est compris entre 0.002 et 200 μm sont mesuré avec l'intrusion de porosimétrie au mercure pour les deux pierres étudié,

calcaire rose (L) et tufs carbonaté (T). Les résultats obtenus et les courbes d'intrusion de mercure sont reportés dans le tableau 4.5 et la figure 4.4.

Tableau 4.5 : Tailles des espaces poreux de calcaire rose et de tuf carbonaté sains déterminé par le porosimètre au mercure (MIP)

	Distribution des rayons porale (%)				
	0,001-0,01 (μm)	0,01-0,1 (μm)	0,1-1 (μm)	1-10 (μm)	10> (μm)
Calcaire rose	72,06	00	14,71	4,41	2,45
Tufs	0	0	0	6,08	93,72

Les résultats de MIP consignés dans le tableau 4.5 montrent que le tuf carbonaté est plus poreux que le calcaire rose, avec une valeur de la porosité connectée calculé par la porosimétrie à intrusion de mercure de 28.09 % pour le tuf et une valeur de 3.85 % pour le calcaire rose. Ces deux pierres exhibent différentes masses volumiques dû à la différence des processus de leur formation.

Le calcaire rose étudié a clairement une distribution porale polymodale (Figure 4.4A). La courbe de distribution du rayon poral de calcaire rose a un pic principal compris entre 0.001-0.01 μm qui représente 72 % du volume total des pores et qui représente selon le principe de la classification de Cardell (2003) la microporosité. Ce type de porosité correspond à la porosité d'interparticulaire avec un rayon moyen de 0,00115 μm . Un deuxième pic est montré entre la classe poral comprise entre 0.1-1 μm avec un volume de 14.71% qui représente la porosité capillaire. Un troisième pic est exhibé à faible proportion a moins de 7% dans les rayons de pore qui sont supérieur à 1 μm . Pour cela le calcaire rose est caractérisé par une importante proportion de petits pores interparticulaires et une faible proportion de porosité capillaire.

Le tuf carbonaté, par contre est de type unimodal où la totalité de l'espace poral (<100 μm) se restreint au seul domaine capillaire qui se situe dans la gamme allant de 0,1 μm à 1 mm (Figure 4.4B). La valeur élevée de la porosité connectée de 28.09% est attribué à une faible densité et une grande porosité ouverte. La courbe de l'intrusion de mercure, montre la présence d'un seul grand pic qui est représenté par les pores à rayon supérieur à 1 μm ce qui lui donne la propriété de représentés des macropores. Ce type de pierre est caractérisé principalement par une porosité capillaire à comprise entre (1-100 μm) et avec des cavités dans une roche de grande taille.

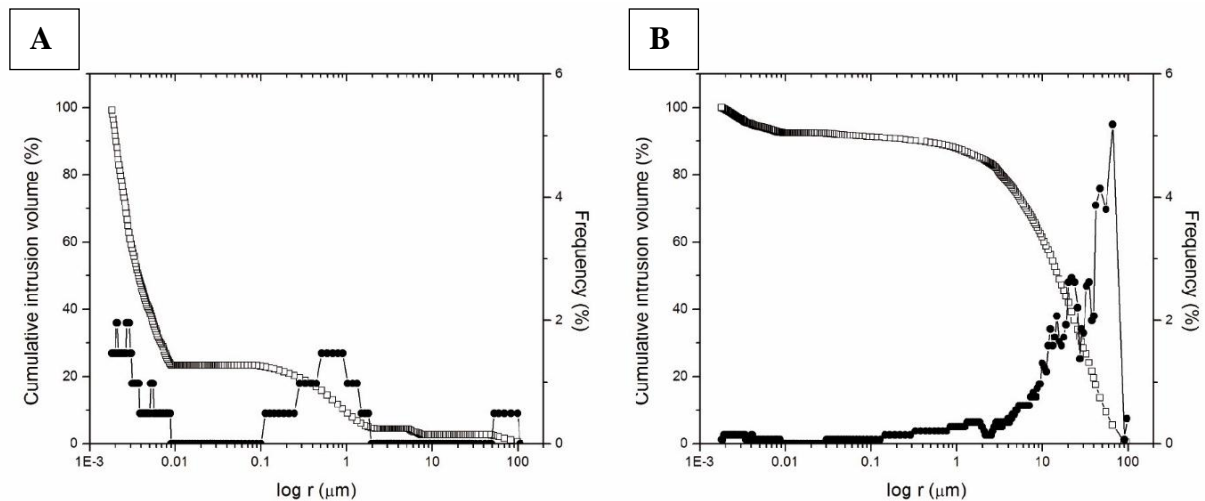


Figure 4.4 : Courbes des distributions des rayons poral avec la porosimétrie à intrusion de mercure pour (A) le calcaire et (B) le tuf carbonaté

4. Essai d'absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité a été déterminée à l'aide de la méthode standard selon la norme UNE EN-1925 (1999) et de la méthode continue selon la méthode (Benavente et al., 2007b). La méthode continue a été utilisée pour déterminer les coefficients d'absorption capillaire, C , des variétés de tuf, car elle permet de caractériser avec précision des échantillons présentant des taux d'absorption élevés ($C > 10 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ h}^{0,5} - 150 \text{ g} / \text{m}^2 \text{ s}^{0,5}$) (Benavente et al., 2007b). Les résultats ont été représentés par la masse d'eau absorbée par surface d'échantillon pendant l'imbibition par rapport à la racine carrée du temps. Les courbes présentent deux parties : la première correspond à l'absorption capillaire, sa pente étant le coefficient d'absorption capillaire C . La seconde définit le stade de saturation. L'expérience a été réalisée en utilisant les mêmes échantillons que ceux utilisés pour caractériser les masses volumiques et les porosités.

4.1. Principe

Lorsque la base d'une éprouvette de roche poreuse est en contact avec l'eau, la tension capillaire développée permet l'ascension du fluide à l'intérieur du milieu poreux. La courbe de la prise de masse en fonction du temps se décompose en deux droites, de pente nettement distincte. La première droite linéaire correspond à la montée de l'eau. D'un point de vue expérimental, et après avoir atteint un maximum correspondant à la porosité capillaire N_c , la prise de masse en eau suit un régime lent (coefficient A) correspondant à la résorption

progressive de l'air piégé dans l'eau environnante. La diffusion de l'air piégé dans les macropores du réseau est contrôlée par la loi de Fick.

Lors de la première étape, l'éprouvette va donc subir une imbibition progressive, l'eau pénètre dans la porosité interconnectée. Ce phénomène peut être suivi grâce à deux paramètres :

■ La frange capillaire (B), sur la face externe de l'échantillon. Son déplacement x (cm), en fonction du temps t (s) s'exprime sous la forme : $x = B\sqrt{t}$

■ La masse, dont les variations sont directement reliées au volume cumulé d'eau absorbée. Tant que la frange capillaire n'a pas atteint le sommet de l'échantillon, m [kg], la quantité d'eau (W) par unité de surface, au temps t (h), s'écrit : $m = W\sqrt{t}$

La saturation du réseau poreux est beaucoup plus lente. Elle correspond au lent remplissage de la porosité piégée, par des phénomènes de diffusion.

On en déduit ainsi W [kg. m⁻².h^{-1/2}], le coefficient d'imbibition capillaire.

4.2. Mode opératoire

L'absorption de l'eau par capillarité a été déterminée selon la méthode standard selon UNE EN-1925 (AENOR, 1999) pour les calcaires roses (Figure 4.5) et la méthode continue pour les tufs carbonatés (Figure 4.6) selon Benavente et al. (2007a). Afin d'analyser l'absorption d'eau capillaire, 5 échantillon de calcaire rose sain et 5 échantillon de tuf carbonaté sain de forme cubiques (5 * 5 * 5 cm) ont été coupés. Cette essai a été effectué sur. Ils ont été séchés à une masse constante à la température de (105 ± 5) °C. Le niveau de l'eau a été maintenu à ce niveau pendant la mesure, en ajoutant de l'eau quand il était nécessaire et en fermant le réservoir pour éviter l'évaporation en cas d'absorption lente d'eau capillaire.

Les échantillons ont été plongés dans environ (0,2 +0,1) cm d'eau. Pour l'acquisition de données, la mesure de la masse (m_{cap}) a été effectuée toutes les 30 secondes pour les tufs carbonatés jusqu'à la saturation (10 minutes) et toutes les 3 minutes pour les calcaires roses jusqu'au septième jour. Le coefficient d'absorption d'eau (valeur C) a été calculé à partir de l'augmentation de la masse par unité de surface par rapport à la racine carrée du temps (valeur $C = m_{cap} A^{-1} t^{-1/2}$).

Les résultats ont été tracés comme la masse d'eau absorbée par zone d'échantillon lors de l'imbibition par rapport à la racine carrée du temps. Les courbes montrent deux parties : la première correspond à l'absorption capillaire, où sa pente est le coefficient d'absorption capillaire A. La seconde définit l'étape de saturation. L'expérience a été réalisée en utilisant les mêmes échantillons que ceux utilisés pour caractériser la porosité ouverte et la masse volumique saturé.



Figure 4.5 : Méthode standards pour la mesure de coefficient d'absorption capillaire EN-1925 (AENOR, 1999)



Figure 4.6 : Méthode continue de mesure de coefficient d'absorption capillaire (Benavente et al, 2007)

4.3.Résultats

Les calcaires roses montrent une faible valeur de coefficient d'absorption capillaire ($C = 3.28 \pm 0.20 \text{ g/cm}^3\text{s}^{0.5}$) (Figure 4.7). En ce qui concerne le tuf carbonaté, la valeur de coefficient d'absorption capillaire est élevée ($C = 653.33 \pm 197.69 \text{ g/cm}^3\text{s}^{0.5}$) (Figure 4.8). Cette différence au niveau de la valeur est due aux différences de réseaux poreux qui sont spécifique pour chaque type de roche. L'absorption capillaire survient généralement dans la taille des pores comprises entre $1\mu\text{m}$ et 1mm qui procure un taux élevé d'absorption d'eau pour une bonne connexion de réseau poral (Benavente et al., 2007b; 2015). Pour cela les pores ($<1\text{mm}$) des tufs carbonatés jouent un rôle majeur dans l'absorption capillaire global, comme ça été montré dans le graphe $C-\phi$ (Fig. 4.9), où la valeur élevée de la porosité montre un taux élevé de coefficient d'absorption capillaire. L'action de transport capillaire est négligeable pour les pores supérieurs à 1mm , et le mécanisme prédominant dans ce cas de figure est la gravité.

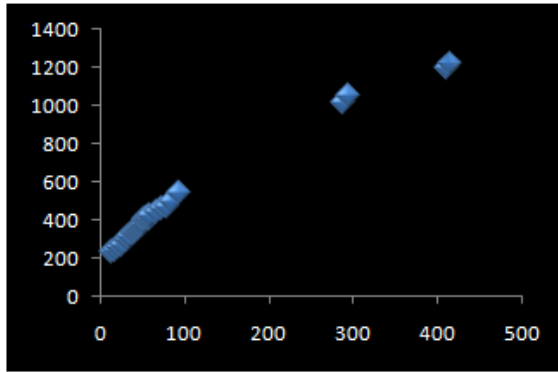


Figure 4.7: Calcaire W / S : masse expérimental d'eau adsorbée par unité de surface, $W(t) / S$ par rapport à la racine carrée du temps, \sqrt{t} .

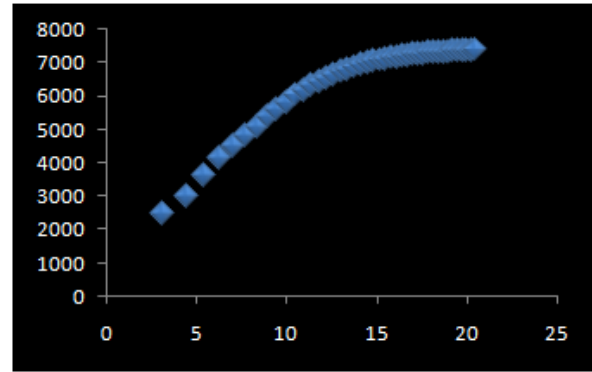


Figure 4.8: Tuf carbonaté W / S : masse expérimental d'eau adsorbée par unité de surface, $W(t) / S$ par rapport à la racine carrée du temps, \sqrt{t} .

En outre, les larges pores de tuf carbonatés sont révélés par la différence existante entre la porosité totale et connectée. En effet, le mécanisme principal qui contrôle le transport des fluides au niveau de ce type de pierre est l'action capillaire et la gravité pour les tufs carbonatés, tandis que l'action capillaire et d'adsorption sont les mécanismes principaux aux niveaux des calcaires roses.

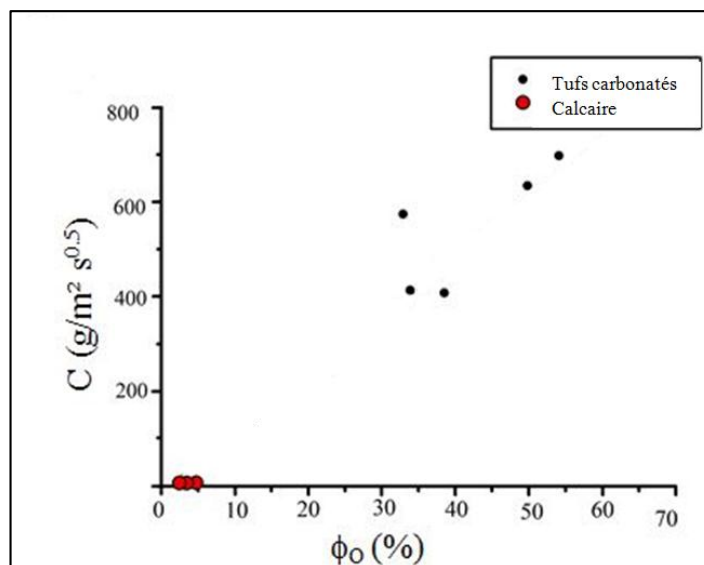


Figure 4.9 : Relation entre le coefficient d'absorption capillaire et la porosité ouverte

5. Propriété ultrasonique

La vitesse des ondes ultrasoniques a été mesurées à l'aide d'un appareil appelé PUNDIT connecté par un équipement de transducteurs (émetteur-récepteur) de signaux (Panametrics-NDT 5058PR) et d'un oscilloscope (TDS 3012B-Tektronix) (Figure 4.10), qui acquies et numérise les formes d'ondes pour les afficher, les traiter et les stocker. Deux types de transducteurs panamétriques ont été utilisés : un couple de transducteurs non polarisé et un couple de transducteurs polarisés en S. Le premier couple a été utilisé pour acquiesir la forme d'onde ultrasonore, puis pour mesurer la vitesse de propagation de l'onde P. Le deuxième couple de transducteurs ultrasonores a été utilisé uniquement pour mesurer la vitesse de propagation de l'onde S. Un couplant viscoélastique a été utilisé pour assurer un bon couplage entre le transducteur et l'échantillon. La fréquence des deux couples de transducteurs était centrée à 1 MHz. Cette fréquence est supérieure aux 20–150 kHz recommandées par les normes espagnole et européenne (UNE-EN 14579, 2005) et a été utilisée à la fois pour améliorer l'interaction entre les ondes mécaniques et les éléments texturaux de la pierre et pour augmenter la résolution. Le nombre d'échantillons mesurés est de 12 pour les tufs carbonatés et de 10 pour les calcaires roses.



Figure 4.10 : Dispositif de mesures des ondes ultrasoniques

5.2. Résultats

Les propriétés mécaniques des roches étudiées ont été déterminées par mesure de la propagation des ondes ultrasoniques, une technique pour évaluer la résistance de matériaux. Ces propriétés ont été déterminées pour les roches étudiées par la mesure des ondes ultrasoniques P et S dans les trois directions de l'espace ainsi que le calcul de coefficient de

poisson et de module de Young (Tableau 4.6). Les ondes S n'ont pas pu être mesurées pour les tufs carbonatés à cause de l'importance de réseau poreux (Tableau 4.7).

La vitesse des ondes ultrasonique P pour le calcaire rose est plus grande par rapport à ceux mesuré au niveau des tufs carbonatés et les ondes S sont mesurées uniquement pour les calcaires roses. Les valeurs relativement élevées des ondes P pour les calcaires roses peuvent être attribué à une faible fracturation et absence d'altération. L'anisotropie des calcaires roses est égale à 1 ce qui signifie qu'il n'y a pas de changement significatif de vitesse dans les trois directions. En plus, la valeur élevée des ondes S mesurées confirme la faible fracturation. Le calcaire rose exhibe une grande valeur de module de Young et de coefficient de poisson. La déduction émise est que les propriétés physico-mécaniques de calcaire rose ont une qualité d'un excellent matériau de construction tels que la pierre de taille ; surtout avec une valeur d'anisotropie proche de 1.

En ce qui concerne les valeurs des ondes ultrasonique Vp des tufs carbonatés, leur faible valeur est montrée par l'importance de réseau poreux observé au niveau de ces pierres et des débris de plantes. L'hétérogénéité de leurs surfaces influence aussi la vitesse des ondes ultrasonique due au manque de cohésion entre les émetteurs et récepteur de l'appareil de mesure. La faible valeur des ondes ultrasoniques indique la faible résistance mécanique de ce type est très fragile et moins résistant par rapport au calcaire rose.

Tableau 4.6 : Valeurs des ondes ultrasoniques (Vp, Vs, coefficient de poisson et de module de Young)

Echantillon	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
Vp1 (m/s)	5898	5939	5703	6013	6062	6078	6228	6206	5786	6212
Vp2 (m/s)							6194	6185	5937	6118
Vp3 (m/s)							6156	6189	6080	6162
Anisotropie							0,99	0,99	0,95	0,985
Vs (m/s)	3122	3161	3092	3175	3167	3061	3294	3194	3100	3259
Poisson	0,31	0,30	0,29	0,31	0,31	0,33	0,31	0,32	0,3	0,310
Young (GPa)	64,97	65,6	62,08	66,00	67,04	63,70	71,39	69,05	63,16	71,79

Tableau 4.7 : valeurs des vitesses ultrasoniques des tufs carbonatés

Echantillon	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Vp (m/s)	3347	3316	3981	3723	3683	3580	3420	2998	3676	3712	3409	4155

La figure 4.11 montre la relation entre les ondes Vp et la porosité totale ou en distingue deux groupes de données (graphique vp-porosité). Le premier groupe est constitué des données mesurées dans les échantillons de calcaire rose (le faciès faiblement poreux) pour ce groupe (Figure 4.11) la vitesse décrit (vp) décroît rapidement avec légère augmentation de la porosité. Le deuxième groupe représente les tufs carbonatés (le faciès très poreux) et montre que les valeurs de vp diminuent légèrement avec une augmentation considérable de la porosité.

En regardant la figure 4.11, nous pouvons voir que certain échantillon de même porosité présentent différentes valeurs de Vp; ce qui induit par déduction que la taille des cristaux (Figure 3.3), leurs orientation, présence de fissure peuvent induire ces différences.

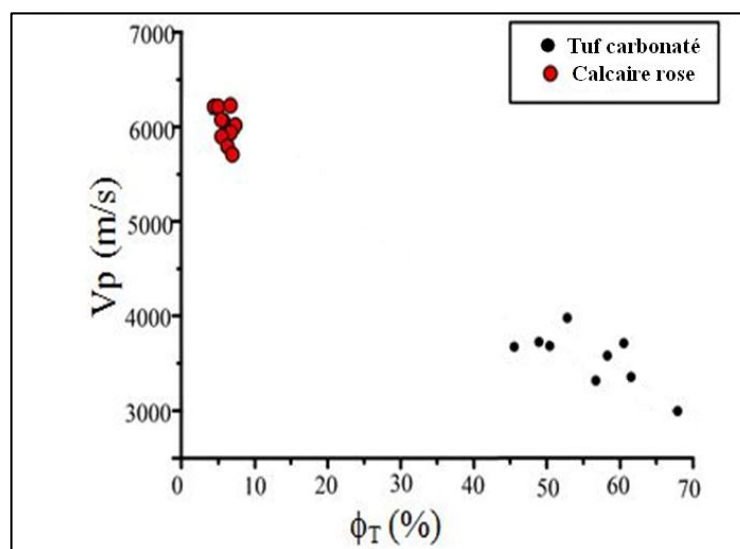


Figure 4.11 : Relation entre la vitesse des ondes ultrasonique et la porosité totale pour les calcaires roses et les tufs carbonatés

6. Essai de compression uni-axial

6.1. Mode opératoire

L'essai de compression uni-axial est un essai mécanique destructif. Le nombre d'échantillons utilisés est de 3 pour le calcaire rose et de 3 pour le tuf carbonaté. L'essai de résistance à la compression uni-axiale a été effectué sur la base de la norme UNE-EN 1926 (2007) en utilisant une machine Ibertest MEH-2000 H / FIB-50 avec des jauges de déformation et un taux de charge de 2,4 kN / s. Les informations de contrainte et de déformation ont été enregistrées par un module d'acquisition de données (HBM-Spider 8) et la courbe de contrainte / déformation a été obtenue et traitée à l'aide d'un programme dédié. La résistance à la compression uni-axiale R_c de la pierre est ensuite donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{F_{\max}}{\pi r^2}$$

Où R_c représente la résistance à la compression (en MPa), F_{\max} la force maximale appliquée lors de la rupture (en N) et S la surface d'application de la force (en cm^2).

6.2. Résultat

La vitesse de chargement appliquée sur le calcaire rose et le tuf carbonaté est de 2.4 KN/s jusqu'à la rupture et destruction totale de l'échantillon. L'essai a été réalisé dans un état sec. La valeur de la résistance à la compression uni-axiale est comprise pour le calcaire rose entre 56,33 MPa et 70,64 MPa ce qui est caractéristique des roches dures.

Pour le tuf carbonaté, la valeur de la résistance à la compression uni-axiale est comprise entre 0,85 MPa et 2,85 MPa ; ce qui est caractéristique des roches tendres (Dobereiner et Freitas, 1986). Cette faible résistance mécanique est évidemment commandée par la forte porosité totale des matériaux (Beck, 2006).

Le calcaire rose présente la plus grande valeur de la résistance à la compression avec une moyenne de 63.71 ± 7.17 MPa par rapport au tuf qui présente une valeur de 2.21 ± 0.58 MPa. La force et la rigidité du calcaire rose et de tuf carbonaté dépendent de la porosité de la roche. Les roches les plus poreuses sont le moins résistante (Figure 4.12).

La relation entre la résistance à la compression et la porosité totale montre une tendance exponentielle. Cela signifie que de petits changements à faible pourcentage de porosité impliquent de grands changements de résistance (Garcia Del Cura et al., 2012). Cette tendance est confirmée par les données publiées dans la bibliographie. Le calcaire rose avec sa faible porosité (6.23 ± 0.83 MPa) à une résistance mesurée d'environ (63.71 ± 7.17) par contre, le tuf carbonaté avec sa grande porosité ($54.82 \pm 4.88\%$) présente une faible résistance à la compression (2.21 ± 0.58 MPa). Ce changement de pente (Figure 4.12) résistance – porosité est dû à un changement des caractéristiques du système poreux. Les roches ayant une porosité inférieure à 10% tel que le calcaire rose présente des pores intercrystallins et intergranulaires (microporosité interparticulaire). Cependant, des valeurs de porosité plus élevées à (>45%) sont associées à la présence de macropores de type vuggy. Les propriétés mécaniques de la roche sont plus sensibles à la microporosité car les micropores sont des défauts entre des éléments structuraux (cristaux). Ils peuvent être considérés comme bidimensionnels, avec un petit rayon de courbure à leur extrémité (Garçia Del-Cura et al., 2012). Par conséquent, la concentration de contrainte au niveau de ces défauts est élevée (selon la théorie de Griffith, 1921). En revanche, les macropores vuggy ont une taille de mm-

cm et ont généralement une géométrie arrondie en raison de leur genèse (bulles enrobées, moulages de plantes, processus micro-karstiques, etc.) (Garcia Del-Cura et al., 2012). L'influence des pores séparés sur la roche est une réduction de surface de la section d'échantillon chargée, mais comme leur rayon de courbure est très élevé, la concentration de contrainte à leur extrémité est faible.

En résumé, deux tendances peuvent être définies : (i) pour les valeurs de faible porosité (<10%), les variations de résistance sont dues au taux élevé des pores interparticulaire contenu dans la roche. L'influence de ce type de porosité sur les propriétés mécaniques est élevée et, en tant que telle, détermine fortement la force de la structure ; (ii) à haute porosité (> 45%), les roches présentent un taux variable en macropores, mais le système microporeux est assez similaire pour ce type de roche.

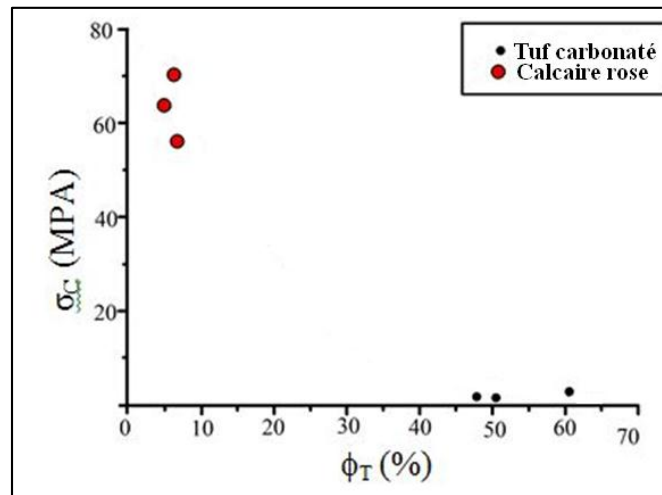


Figure 4.12 : Relation entre la résistance uni-axiale et la porosité totale pour les calcaires roses et les tufs carbonatés

7. Conclusion

Le calcaire rose présente une faible porosité caractérisée par des micropores et une compacité importante. En outre le tuf carbonaté, quant à lui est caractérisé par un volume important de macropores. Cette propriété de la structure des pores est bien indiquée dans le coefficient d'absorption capillaire, où la faible valeur de la porosité de calcaire rose est indiquée par la faible valeur de coefficient d'absorption capillaire, alors que le tuf carbonaté présente une valeur élevée de coefficient d'absorption capillaire.

La porosité influence aussi fortement la propriété mécanique, affiché par la relation linéaire négative des vitesses de l'onde P et de la porosité car l'espace des pores entrave la propagation des ondes ultrasonores. La relation entre la résistance à la compression et la porosité présente une tendance exponentielle négative. Les deux types de pierres calcaires roses et les tufs carbonatés présentent une résistance moyenne à très faible allant de 56 à 70 MPa pour les calcaires roses et de 1,5 à 3 MPa pour les tufs carbonatés. La connaissance des propriétés physico-mécaniques des pierres est primordiale pour des prédictions de leurs comportements dans l'environnement d'utilisation.

Chapitre 5 :
Caractérisation de la
dégradation des matériaux
de la Muraille et de la
Basilique de Tebessa

1. Introduction

L'augmentation alarmante de la dégradation observée sur les monuments historiques et le danger irréversibles qui les guettent requièrent des mesures immédiates de protection, préservation et restauration. Cette dégradation est dû à l'interaction entre les matériaux de construction (les pierres) et les facteurs environnementaux qui contrôlent le type et l'étendue des dégâts enregistrés (Fitzner et al., 2004). Ces dégâts sont exhibés sous formes de changements morphologiques appelés formes d'altération. Depuis plusieurs décennies, la description et l'explication des processus de dégradation qui affectent les roches était l'objet d'étude par les géologues et les géomorphologues (Robinson and Williams, 1994; Turkington and Paradise, 2005; Seidel et al., 2011).

La compréhension des processus de dégradation et le rôle des facteurs intrinsèques et extrinsèques est une condition cruciale, à la fois pour la conservation et la restauration des blocs dégradés et le choix des pierres de remplacement appropriées (Seidel et al., 2011). Ce chapitre qui est une exploration profonde de l'état d'altération et des changements minéralogiques et texturales des pierres de la muraille vise à identifier les facteurs à l'origine de ces changements. Il s'agit, en effet, de facteurs climatiques et environnementaux tels que l'eau, l'ensoleillement, la pollution et la localisation des pierres dans l'édifice. Des méthodes d'investigations in-situ (cartographies des monuments, essai de marteau de Schmidt) et aux laboratoires (masse volumique, porosité totale et ouverte, MIP, DRX, SEM-EDS) sont utilisées pour l'étude des dégradations sur le plan qualitatifs et quantitatifs.

2- Cartographie des Monuments

La cartographie des monuments a été développée pour l'enregistrement, la documentation et l'évaluation des lithologies et formes d'altération des pierres (Fitzner et al., 2004). C'est une méthode qui a été développée par une équipe de recherche allemande de l'université Aachen «Natural stones and weathering/Aachen University of Technology», est considéré comme une procédure d'investigation non destructive pour les études in-situ des dommages liés à la dégradation des pierres (Fitzner et al., 1995). Deux modes de cartographie peuvent être distingués : la cartographie lithologique et la cartographie des formes d'altération. Les prérequis pour la cartographie des monuments sont les plans des zones à étudier, les schémas de classification des lithologies existantes et formes d'altération (figure 5.1).

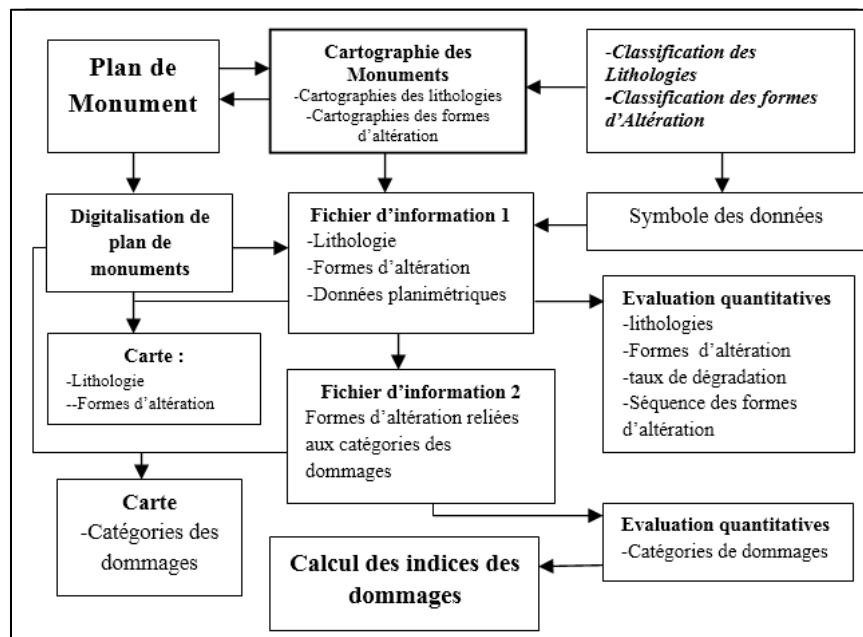


Figure 5. 1 : Etapes de la cartographie des monuments (Fitzner et al., 1995)

2.1- Cartographie des lithologies

2.1-1. Classification et cartographie des lithologies sur les monuments

Durant les étapes de construction, plusieurs paramètres externes peuvent commander les types de pierres utilisées, tels que la disponibilité, maniabilité des pierres et les considérations architecturales et artistiques du monument lui-même (Seidel et al., 2011). Lors de la reconstruction ou remplacement de la pierre dégradée, certains types de pierre peuvent être non disponibles, ce qui conduit à l'utilisation de différents types de pierres supplémentaires. Dans ce cas, la connaissance du nouveau type de pierre est fondamentale pour pouvoir prévoir son comportement et sa vulnérabilité dans l'édifice face aux processus d'altération.

Selon Fitzner et al., (1995), l'augmentation de l'hétérogénéité spatiale de la distribution des pierres augmente le besoin d'un enregistrement exact et de la localisation de ces types de pierres. Afin de mener à bien l'étape de la cartographie des lithologies, plusieurs étapes sont nécessaires pour l'établissement de cet enregistrement :

- Description macroscopique des différents types de pierres observés, couleur, texture, fossiles, fissures, granulométrie (Voir Chapitre 3).
- Description microscopique et classification pétrographique des différents lithotypes.

Durant le processus de la cartographie lithologique, la zone préalablement sélectionnée doit faire l'objet d'une étude géométrique et spatiale et cartographiée systématiquement par

référence au type et à la distribution des pierres naturelles. Les informations liées à la lithologie et à sa distribution sont illustrées par des cartes lithologiques et les lithotypes sont évalués quantitativement. L'évaluation quantitative des lithotypes peut être faite en fonction du nombre de blocs utilisés ou de la surface occupée par chaque type de pierre répertorié.

Outre, les descriptions géologiques de ces pierres ; la connaissance de la provenance géologique de ces pierres devra être effectuée selon une investigation géologique autour des monuments étudiés (Voir chapitre 3).

2.1.2. Résultats

L'ensemble des quatre façades de la muraille byzantine et de la Basilique romaine présentent quatre types de roches et l'abondance de chaque type pétrographique a été évalué quantitativement (Planche 5.1), (Tab.5.1). Les calcaires rosâtres du Turonien moyen sont les plus utilisés dans toutes les façades avec un taux dépassant les 97 % dans la façade Nord (Planche 5.1A). Ce même calcaire présente un taux de 72 % dans la façade Est (Planche 5.1C) et un taux de 42,65 % dans la façade Sud (Planche 5.1B) par rapport aux zones cartographiées. Dans la façade Est, le calcaire rose est utilisé principalement à plus de 2 m de hauteur. L'utilisation de ce faciès est due probablement à la proximité des carrières d'extractions.

Les tufs carbonatés sont peu utilisés dans la façade Nord et Est, on note la présence de quelques pierres seulement. Cependant, dans la façade Est et sud, ils sont plus abondants (plus de 100 blocs). Dans la façade Est, les tufs représentent moins de 26,6 % et leurs utilisations est beaucoup plus recenser dans la partie basse de la façade (Tableau 5.1). Les tufs carbonatés sont utilisés dans la partie haute de la façade sud et avec seulement quelques blocs qui sont utilisés dans les différents niveaux. Leur présence est décelée beaucoup plus dans la partie Ouest de la façade sud avec seulement une dizaine de pierres utilisées à différents niveaux en l'occurrence la partie centrale et supérieure avec un taux de 37,13 %. Les calcaires crayeux sont présents uniquement dans la façade Sud avec un taux de moins de 11,9 %. Ces calcaires crayeux sont utilisés surtout à la base et au milieu de la façade, ainsi qu'au niveau des arcs. En ce qui concerne les calcaires beiges de Turonien, ils n'ont pas été utilisés d'une manière fréquente ou leur taux ne dépasse guère les 8,33 % dans la partie Sud, 1,54 % dans la partie Nord et plus de 0,6 % dans le coté Est. Au niveau de la basilique Romaine, les calcaires roses de Turonien est le type pétrographique le plus répandu (Planche 5.1D).



Planche 5. 1 : Cartographies des lithologies des différentes façades et monuments, façade Nord (A) Est (B) Sud (C) et au niveau de la Basilique (D)

En résumé, la façade sud de la muraille byzantine est représentée par les quatre lithotypes. Sur la façade Est de la muraille, les calcaires roses, les tufs carbonatés et les calcaires beiges

sont les roches utilisées, alors que le calcaire crayeux est absent. La façade Nord montre la présence des calcaires roses, tufs carbonatés ainsi que les calcaires beiges. Le calcaire rose est le type le plus abondant dans la Basilique.

Tableau 5. 1 : Evaluation quantitative des lithologies en fonction des façades et des surfaces étudiées.

	Surface étudié/direction de la façade (m ²) /Direction			Taux (%)		
	Nord	Est	Sud	Nord	Est	Sud
Calcaire rose	15,67	17,33	29,28	97,63	72,77	42,64
Calcaire beige	0,25	0,14	5,72	1,54	0,61	8,33
Tuf carbonaté	0,13	6,34	25,49	0,83	26,62	37,12
Calcaire crayeux	0	0	8,17	0	0	11,9
Taux	16,05	23,82	68,66	100	100	100

2.2. Cartographie des formes d'altération

2.2.2. Classification des formes d'altération

L'effet des conditions environnementales sur la structure de la pierre induit différentes formes d'altération. Les changements sur la surface des pierres peuvent être décrits à l'aide de terminologie spécifique utilisant des critères morphologiques et géométriques (Seidel et al., 2011). Divers systèmes de classification de ces formes d'altération ont été établis dans le passé (Arnold et al., 1979; Grimmer, 1984; Beeger, 1988; Raccomandazione Normal 1/88, 1990; Fitzner et al., 1995). Ces classifications ont rencontré plusieurs problèmes lors de l'utilisation de certains termes (Seidel et al., 2011) et d'autre encore, voient leurs origines au début de la moitié du XXe siècle (Hirschwald, 1908; Kieslinger, 1932; De Quervain, 1945).

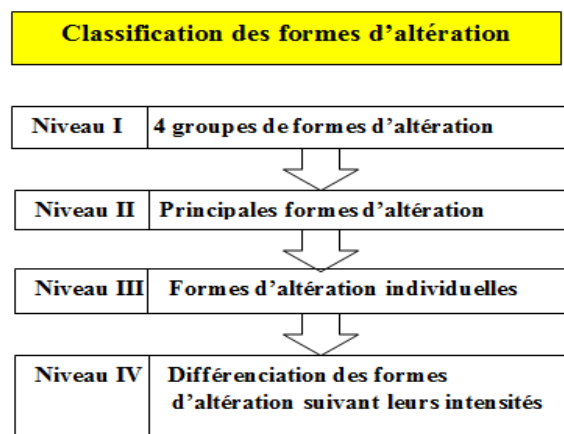


Figure 5. 2 : Classification des formes d'altération (Fitzner et al., 1995)

Une caractérisation claire et précise des phénomènes d'altération et de leurs critères ont été développés pour décrire ces phénomènes d'après le système de classification établie par Fitzner et al., (1995). Ce système de classification est basé sur quatre niveaux bien distincts. Le premier niveau se compose de quatre groupes fondamentaux de formes d'altération :

Groupe 1 : perte de matière,

Groupe 2 : décoloration / dépôts,

Groupe 3 : détachement

Groupe 4 : fissures / déformation.

Dans le second niveau de cette classification, 25 principales formes d'altération peuvent être différenciées, alors que dans le troisième niveau, 75 formes d'altération peuvent être différenciés. Une actualisation a été effectuée par Fitzner et Heinrichs (2001) qui ont introduit une version actualisée (www.stone.rwth-aachen.de). Le quatrième niveau concerne une différenciation individuelle de chaque forme d'altération par leur intensité d'occurrence telle que la profondeur de recul, épaisseur des desquamations (écaille), surface affectée et le volume détaché et l'ouverture d'une fissure ou fracture.

Les formes d'altération sont utilisées pour la description précise des phénomènes de dégradation à la méso-échelle (cm à m) (Viles, 1996). Ces formes d'altérations représentent les effets visibles des processus de dégradation. Quatre catégories de formes d'altération ont été définie (Fitzner et al., 1995).

La catégorie « perte de matière » incluent toutes les formes d'altération se manifestent par une perte de matériaux ou d'éléments d'une pierre. Cette catégorie est subdivisée en alvéolisation (creusement), érosion (érosion différentielle et perte de constituants, perte de matrice, érosion en boule et augmentation de rugosité), les dégâts mécaniques (trace d'impact, incision, rayure, abrasion, bûchage), microkarst, partie manquante (trou), perforation et pitting.

La catégorie "décoloration et dépôt" comprend toutes les formes d'altération qui caractérisent les modifications de la couleur de la pierre et de dépôt sur la surface de la pierre ou près de la surface de la pierre. Cette catégorie comprend des croûtes (croûte noire, croûte saline), altération chromatique (coloration, décoloration, assombrissement dû à l'humidité, tache), efflorescence, encroutement (concrétion), film, aspect brillant, graffiti, patine (riche en fer, patine oxalate), encrassement et subefflorescence.

La catégorie des « fissures et déformations » sont définies comme des fissures individuelles, clairement visibles à l'œil nu, résultant de la séparation d'une partie de l'autre.

Cette catégorie peut provoquer des motifs de détachement, comme l'éclatement ou fragmentation. Elle est subdivisée en fractures, fissures en étoile, craquelures, craquellement et clivage, tandis que la "déformation" se réfère à un changement de forme sans perte d'intégrité, conduisant à la flexion, le flambage ou la torsion d'une pierre. Dans ce dernier cas, la déformation affecte principalement les dalles de marbre cristallin ou des granites et même les calcaires peuvent aussi montrer une flexion (Siegesmund et al., 2008a; b).

La catégorie "détachement" comprend toutes les formes d'altération montrant la désintégration de structures des pierres en échelles macroscopiques et microscopiques Boursouffure, éclatement, délamination (exfoliation), désintégration (émiettement, désagrégation granulaire), la fragmentation (fragmentation en esquilles, épaufrure), le pelage et la desquamation (écaillage, desquamation en plaque). En se référant à la désintégration granulaire, trois formes d'altération peuvent être distinguées tels que la pulvérulence, désagrégation sableuse et désagrégation saccharoïde qui sont liés à la taille des grains des pierres (ICOMOS, 2008; Seidel et al., 2011). La désagrégation granulaire dans les grés montre des formes transitoires à la fois pour l'écaillage et à l'effritement (Fitzner et al., 1995). L'émiettement est la fragmentation en esquilles comme un détachement de plus gros élément.

Une autre catégorie peut être différenciée qui est la "colonisation biologique" désignant la colonisation de la pierre par les plantes et les micro-organismes tels que les bactéries, les cyanobactéries, les algues, les champignons et les lichens. La colonisation biologique comprend également l'influences d'autres organismes tels que les animaux fouisseurs et ceux vivant et nichant dans la pierre.

2.2.3. Cartographies des formes d'altération

Une condition préalable à la cartographie des formes d'altération est la disponibilité d'un plan de façade à l'échelle étudiée. Qui montre exactement la taille et la forme des pierres de construction utilisées. Aussi, l'utilisation des photos prises à divers angles est un autre moyen de report exact des données dimensionnelles appropriées comme une base cartographique. Les données cartographiques dans le cas de la présence de photos peuvent être reportés et transférées dans un modèle numérique sur Arc Gis ou autre logiciel de cartographie.

Chaque forme d'altération est marquée sur la carte par une couleur différente ou des signes différents pour visualiser le type et l'étendue de l'altération. Plusieurs systèmes de signatures ont été proposés par des auteurs tels qu'Eickelberg et al., (1990) et Fitzner et al., (1995). Une charte internationale des couleurs et de signature n'existe pas encore. L'intensité de chaque

forme d'altération peut être affichée par des couleurs plus sombres ou plus claires ou par des signatures spéciales (Fitzner et al., 1995).

Aussi, les parties remplacées des surfaces en pierre ou les joints utilisés peuvent être reportées. Car cela, donne une idée sur les travaux de restauration antérieurs et la résistance des pierres en question.

Différentes formes d'altération peuvent coexister ou se superposer sur différents types de constructions qui utilisent des pierres de construction naturelles. Après que les formes d'altération ont été analysées et enregistrées, une carte montrant le type et l'intensité de dégradation devrait être dessinée. Cette cartographie fournit un aperçu des différentes formes d'altération existant avec leurs évaluations quantitatives en relation avec leur distribution spatiale (localisation, orientation et hauteur).

Les objectifs suivants peuvent être atteints dans le cadre d'une analyse des dommages :

- Enregistrement de l'état actuel de dégradation. Cela pourrait être utile pour des fins scientifiques (par exemple, l'enregistrement de la progression des altérations, la dépendance sur les influences environnementales) ainsi que de documenter le point de départ de la conservation ou de restauration.
- Acquérir des informations sur la répartition des altérations sur l'objet et la localisation des zones les plus dégradées. Les résultats peuvent donner une indication sur les causes et les mécanismes d'altération. Par exemple, l'altération des pierres par efflorescence de sel concentrée principalement à la base d'un monument pourrait être causée par l'humidité croissante. Cette hypothèse devrait être vérifiée par échantillonnage sélectif pour les enquêtes sur l'humidité et le sel dans les zones touchées.
- L'ampleur et l'intensité de l'altération enregistrée par la cartographie systématique sont la base pour la planification détaillée des mesures de restauration et l'évaluation des coûts.

2.2.4. Résultats

La muraille byzantine et la Basilique Romaine de Tébessa présentent une large gamme de formes d'altération qui affectent les pierres utilisées dans leur structure (Planche 5.2). Une évaluation quantitative des formes d'altération a été effectuée pour les différentes façades de la muraille et de la basilique de Tébessa.

Au niveau de la façade Nord (Planche 5.2A), les calcaires roses à bioturbation présentent généralement des efflorescences, salissures et écaillages à leur base. A partir de la première rangée de pierres de taille, soit 60 cm au-dessus de niveau de sol, les formes d'altération les plus abondantes sont l'alvéolisation (Figure 5.3a), l'écaillage (Figure 5.3c), subefflorescence

(Figure 5.3b), croûte blanche et desquamation. Entre les hauteurs de 1,5 m et 3m, les formes d'altération les plus abondantes sont en générale, l'écaillage et l'alvéolisation, perte de matière et croûte blanche. La décoloration affecte les calcaires riches en bioturbation. Plus les calcaires roses sont riches en bioturbations plus l'altération est importante. A partir de 3 m jusqu'au sommet de la muraille, seules l'écaillage et l'alvéolisation sont les plus dominant. La fissuration touche les pierres sur toute la hauteur de la muraille.

L'efflorescence est liée au mouvement capillaire de l'eau et des fluides riches en particules, tandis que l'eau de pluie cause l'encrassement, ce qui fait que la poussière adhère aux parties inférieures des pierres. L'écaillage est lié à l'alvéolisation, qui est une étape dans le processus de formation des alvéoles (Cassar, 2002). Les fissures affectent certaines pierres de taille et sont indépendantes de la structure du calcaire (lit). Les bioturbations sont riches en goethite qui dès le contact avec l'eau donne une couleur rougeâtre à brunâtre qui se voit se propager autour des surfaces de bioturbation dû au transport de ces particules oxydées par l'eau ; ce qui explique l'altération par décoloration. Au niveau de ces bioturbations, une désagrégation granulaire est observée.

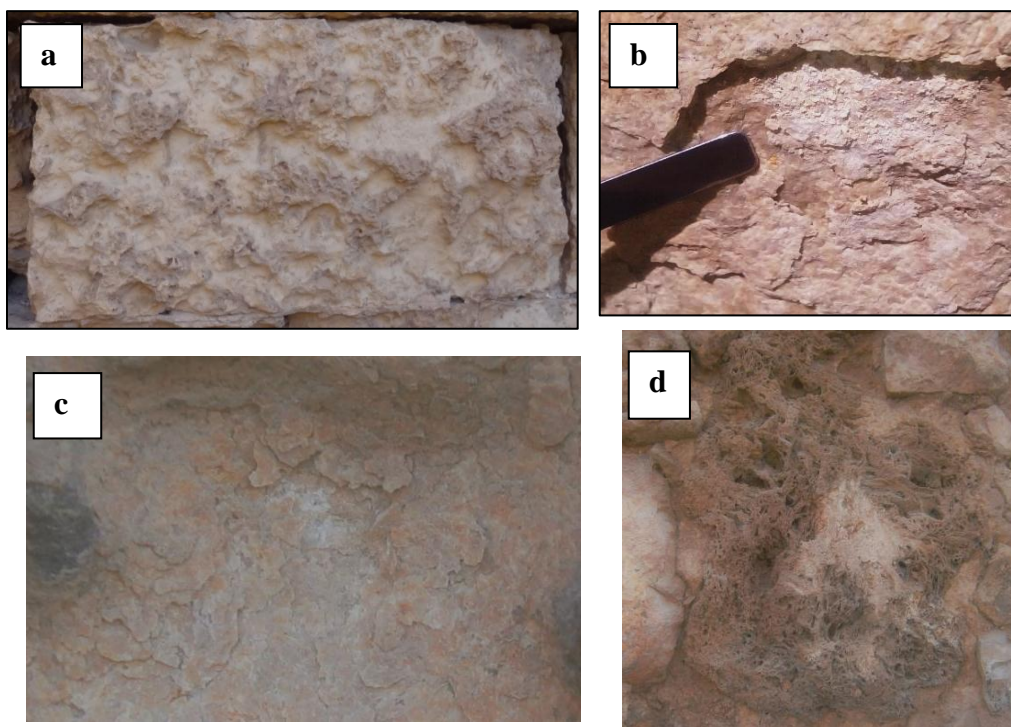


Figure 5. 3 : Différentes formes d'altération (a) alvéolisation (b) Subefflorescence (c) écaillage (d) désagrégation granulaire

Les calcaires roses riches en bioturbations sont moins altérés dans la façade Est par rapport à la façade Nord, notamment dans la partie moyenne est supérieure. Dans les 3 mètres inférieures de la muraille, les calcaires montrent plus d'écaillage. Notant que la majorité des pierres montre un buchage qui est une forme d'altération non cartographiée dans notre étude vue que c'est dû aux méthodes de taille.

La façade Sud est moins altérée que la façade Nord, cela est probablement dû à l'action environnemental plus d'une restauration possible avec l'utilisation de nouvelles pierres. Au niveau des calcaires roses à la base de la muraille, l'écaillage (28 %) et les salissures sont les plus prononcés (Tableau 5.2). Dans la partie médiane de la muraille, en remarque la présence de Buchage qui est considéré comme une forme d'altération. La désagrégation granulaire avec un taux de 44 %, l'écaillage et la croute blanche sont aussi des formes présentes dans cette partie médiane. Dans la partie supérieure de cette façade, l'alvéolisation, décoloration, perte de matière et l'écaillage sont les formes d'altération les plus abondantes. Les fissures sont moindres mais affectent la pierre à tous les niveaux et sont aléatoirement orientées.

En ce qui concerne les tufs carbonatés, ils sont moins altérés et dégradés dans la façade Nord en nombre de quelques dizaines de pierres avec des formes d'altération tels que la perte de matière (poudrage et désagrégation granulaire) (Figure 5.3d), dans les niveaux médians et ils présentent une coloration grisâtre intense sur l'ensemble de la muraille. Dans la façade Sud, ce même type de pierre présente une altération prononcée en forme de poudrage et de perte de matière dans le niveau supérieur. Sur la façade Est (Planche 5.2B), les tufs carbonatés utilisée dans la partie basse de cette façade présentent un état avancé de dégradation. Ils montrent notamment des pertes de matières par désagrégation granulaire et une fracturation prononcée. L'absence de ce type de pierre est observée au niveau de la façade Ouest et de la basilique Romaine.



Planche 5. 2 : Cartographie des formes d'altération dans différentes façades de la muraille de Tébessa face Nord (A) Est (B) Sud (C) et au niveau de la Basilique (D)

Les calcaires beiges, dans la façade Nord sont affectés seulement par l'écaillage ainsi que la façade Est. Dans la façade Sud, ces calcaires beiges présentent de l'écaillage. Le buchage est abondant dû au processus de taille lors de leurs extractions.

En ce qui concerne les calcaires crayeux qui sont utilisés qu'au niveau de la façade Sud (Planche 5.2C), ils présentent certaines formes d'altération comme le poudrage, la délamination et l'alvéolisation à tous les niveaux. Alors que certaines surfaces ne présentent aucune altération visible.

D'une manière générale, les parties les plus altérées au niveau de la muraille byzantine sont ceux se trouvant soit dans la partie basse, inférieure à 3 mètres, où ceux se trouvant dans les parties supérieures à 5 mètres. En plus, l'altération est plus prononcée dans les zones humides abritées que dans les zones bien exposées. Notons aussi que la dégradation est plus prononcée du côté Nord et Est pour l'ensemble de la muraille. Les altérations non réversibles, sont directement liées à l'orientation et l'environnement des monuments ainsi que les propriétés des pierres utilisées qui occasionnent des dégradations importantes.

Au niveau de la basilique Romaine (Planche 5.2D), plusieurs formes d'altération peuvent être distinguées dans les calcaires roses. L'écaillage représente la forme d'altération la plus marquée au niveau de toute la surface cartographiée avec un taux de 60 % (Tableau 5.2). L'alvéolisation est la deuxième forme d'altération qui affecte les calcaires roses avec un taux dépassant les 30 %. La décoloration touche les zones bioturbés avec accentuation de leur teinte en rouge brunâtre. En note aussi la présence des croûtes noires au sommet de la façade qui sont due à la pollution. Cette façade montre un état avancé de dégradation. La présence des dépôts noirs est observée essentiellement dans les zones hautes des murs protégés des pluies battantes (zones noires). L'aspect de ces croûtes noires est très variable. Leurs épaisseurs ne dépassent généralement pas les centimètres. Cette forme d'altération est peu répandue au niveau des monuments de la ville de Tébessa. Dans la plupart des cas, lorsque cette couche noire est peu épaisse, elle garde le relief originel de la pierre.

L'écaillage est la forme dominante au niveau des façades de la muraille avec plus de 69,14% dans la façade Nord, 37,2 % dans le Sud, et 56,91 % dans l'Est et 60,43 % dans la basilique romaine (Tableau 5.2). L'alvéolisation est observé avec un taux de 5 à 36 % dans la façade Nord qui est conjointement liée à l'écaillage. Dans la façade Est, il est représenté par 8 % et il est moins prononcé dans la façade Sud avec un taux de moins de 3 %. La perte des constituants est présente dans la façade Est avec un taux de 35% qui touchent beaucoup plus

les tufs carbonatés. En remarque que l'altération touche une plus grande surface dans la façade Nord (90 %) et Est (89 %) comparé à la façade Sud (78 %) (Tableau 5.2).

De ce fait environ 27 % de cette façade Sud n'est pas affectée par l'altération. Le faible taux d'altération au niveau de cette façade suggère deux hypothèses : la restauration de cette façade par l'utilisation de nouvelle pierre et la faible influence des conditions environnementale au niveau de cette façade.

Tableau 5. 2 : Quantification des formes d'altération selon les différente façades et monuments

Formes de d'altération	Nord	Est	Sud	Basilique
Ecaillage	69,14	56,91	37,2	60,43
Alvéolisation	36,77	8,1	3,85	29,96
Croute blanche	10,54	-	6,5	-
Salissure	5,15	-	-	0,55
Décoloration	-	-	0,1	8,26
Efflorescence	3,6	-	-	-
Croute Noir	-	-	-	0,41
Désagrégation granulaire	1,8	35,02	29,28	0,4
Poudrage	0	-	6,34	-
Éclat	0	-	1,4	-
Surface Affectée	16,05m ² /100%	16,28m ² /89,72%	40,81m ² /59,45%	14,09m ² /100%
Surface Non affectée	0	1,86m ² /10,28%	27,85m ² /40,56%	0

2.3. Cartographie des dommages d'altération

Les catégories des dommages ont été établies pour une classification des taux des dommages engendrés au niveau des structures bâties (Fitzner et al., 2002). Ils complètent l'approche cohérente de la caractérisation, de l'évaluation et de la quantification des dommages des pierres (Fitzner and Heinrichs, 1998).

Pour l'évaluation des dommages individuels, cinq catégories de dégâts ont été définies : 0 – pas de dommage, 1 – dommage légers, 2 – dommage moyen, 3 – dommage sévère, 4 – dommage très sévères. Basé sur des systèmes de corrélation, toutes les formes d'altération sont liées aux catégories de dommages.

Le développement des systèmes de corrélation adapté au « formes d'altération- catégories de dommages » (Figure 5.4) doit tenir compte de l'intensité des dégradations, de la proportion de parties de pierre dégradées par rapport à l'ensemble de l'édifice (par exemple pierre de taille) et de la fonction des éléments structuraux ainsi que la valeur historique et artistique des éléments structurels.

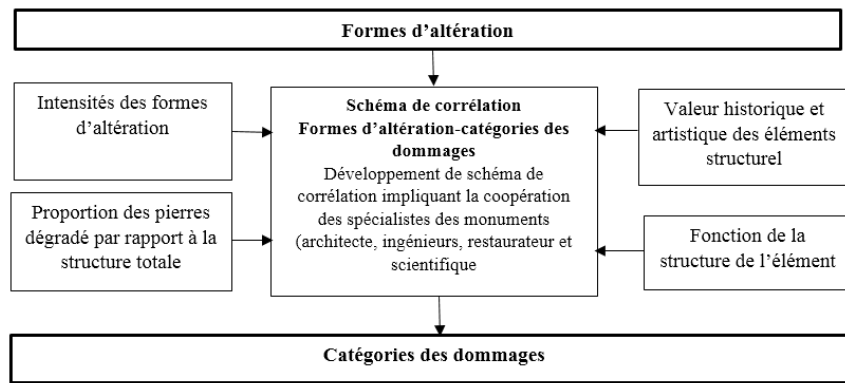


Figure 5. 4 : Relation entre formes d'altération et catégories des dommages (Fitzner et al., 1995).

2.3.1. Résultats

Les catégories de dommages cartographiés au niveau de ces façades sont effectuées en accord avec l'épaisseur ou profondeur de recul des surfaces (de récession surface perdue). De ce fait cinq catégories en été tirée.

Catégorie 0 (pas de dommages) : < 0.2 cm

Catégorie 1 (dommage léger) : 0.2 - 0.8 cm

Catégorie 2 (dommage moyen) : 0.9 - 3 cm

Catégorie 3 (dommage sévère) : 3 - 6 cm

Catégorie 4 (Dommmage très sévère) >6 cm

Les résultats obtenus sont représentés dans la planche 5.3 et l'évaluation quantitative de chaque catégorie et cela est estimé sur chaque façade.

Au niveau de la façade Nord, les cinq catégories de dommages ont été cartographiées. Les surfaces des pierres cartographiées sont touchées principalement par une dégradation moyenne à sévère avec des taux de 57 % et 33 % respectivement. Ces dommages avancés qui surviennent au niveau de cette façade montre l'urgence de la préservation. En effet ces catégories de dommages sont liées étroitement aux formes d'altération. L'écaillage et l'alvéolisation sont les deux types de formes d'altération les plus dommageables, et il a été montré que l'écaillage est précurseur à l'alvéolisation qui est la première étape de sa formation (Cassar, 2002). Les dommages sont en général présents dans les parties basses de la façade a moins de 3 m du niveau de sol dans les zones abrités et humides. Cette observation montre l'importance de l'effet de l'eau et de l'humidité sur les processus de dégradation.



Planche 5. 3 : Cartographies des catégories de dommages au niveau des différentes façades de la muraille, façade Nord (A) Est (B) Sud (C) et de la Basilique (D)

L'évaluation quantitative des catégories des dommages sont indiqués dans le tableau 5.3. La façade Nord indique la présence des catégories de dommage moyen (32,36%) à sévère

(45,95%). Cette façade est affectée beaucoup plus par un écaillage et une alvéolisation prononcés. Les dommages légers présentent que 20,96% de la totalité des dommages engendré du principalement aux subefflorescences et aux croûtes blanches.

Au niveau de la façade Sud, les pierres de taille présentent des dommages qui ne dépassent pas la catégorie moyenne (28 %) (Tableau 5.3) avec des grandes surfaces non-dégradées (45 %). Deux catégories de dommages sévère (7,7 %) et très sévère (1,4%) peuvent être observées mais qui affectent seulement les blocs de calcaires crayeux qui montrent leur faible durabilité et résistance. La forme d'altération qui touche ces pierres est la perte du constituant. L'écaillage est présent mais ne montre pas une dégradation avancée. Cet état avancé est visible à une hauteur de plus de 2 m du sol. Les parties non endommagées et non touchées par l'altération et la dégradation s'expliqueraient par une phase de restauration au niveau de ces façades ou dû aux faibles influences environnementales.

Au niveau de la façade Est, les catégories des dommages les plus observées sont les dommages légers avec un taux de 33% qui sont observé à plus de 1 mètre du sol avec les dommages moyens qui présentent un taux de 14,4 % (Tableau 5.3). Ces dommages touchent les calcaires beiges et les calcaires roses qui présentent peu de formes d'altération avec une faible intensité. Les catégories des dommages sévères et très sévères présentent des taux de 18 % et moins de 8 % respectivement. Ces deux catégories touchent les tufs carbonatés dans la partie basse de la muraille liée aux formes d'altération telles que la perte de constituant, poudrage et fracturation.

Au niveau de la basilique Romaine, les catégories des dommages observées sont les dommages sévères à très sévères avec des taux de 56 % et 15 %. Ces dommages sont sous l'influence directe des conditions environnementale et ils se manifestent par un écaillage et une alvéolisation avancée. Les dommages légers présentent 11 % sont liés à l'écaillage et à la présence des croutes noires. Ces croutes noires se forment principalement dans des endroits abrités de la pluie ce qui donne une faible intensité de dégradation.

Tableau 5. 3 : Evaluation quantitative des catégories de dommages

	Catégorie 0	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4
Sud	45,13413924	17,76623944	27,95383047	7,718613458	1,427177396
Nord	0	20,95713711	32,36360614	45,95230355	0,726965415
Est	26,25651604	33,18562391	14,42829337	18,27770071	7,851878567
Basilique	0,537937965	11,43041507	16,48712646	56,24753716	15,29698335

2.4. Indice des dommages

Les catégories de dommage sont illustrées en carte (cf. Planche 5.3) et évaluées quantitativement (Tableau 5.3). Les indices de dommages : indice de dommage linéaire DI_{lin} et indice des dommages progressif DI_{pro} sont définie comme des paramètres numérique pour une quantification conclusive et la mesure du taux des dommages de la dégradation. Ces calculs sont basés sur l'évaluation quantitative des catégories de dommage (Figure 5.5). L'indice de dommage linéaire correspond à la moyenne des catégories des dommages, où l'indice de dommage progressif met en évidence la portion de la dégradation la plus sévère pour mettre un plan d'urgence pour les mesures de préservation. Les deux indices peuvent avoir un taux entre 0 à 5.

<p>Indice de dommage linéaire</p> $DI_{lin} = \frac{(A.0)+(B.1)+(C.2)+(D.3)+(E.4)}{100}$	<p>Indice de dommage progressif</p> $DI_{pro} = \frac{\sqrt{(A.0^2)+(B.1^2)+(C.2^2)+(D.3^2)+(E.4^2)}}{100}$
<p>A= Surface (%)- dommage catégorie 0 B= Surface (%)- dommage catégorie 1 C= Surface (%)- dommage catégorie 2</p>	<p>D= Surface (%)- dommage catégorie 3 E= Surface (%)- dommage catégorie 4</p>
$\sum_A^E = 100$	
$0 \leq DI_{lin} \leq 5$	$0 \leq DI_{pro} \leq 5$

Figure 5. 5 : Indices des dommages linéaires et progressif (Fitzner et al., 2002).

2.4.1. Résultats

Les résultats de calculs des deux indices sont reportés dans le Tableau 5.4. Les façades qui présentent un état de dégradation le plus avancé sont celles qui correspondent à la façade Nord de la Muraille et de la Basilique.

La basilique présente un Indice de dommage linéaire élevé et montre l'état avancé de la dégradation. La valeur alarmante de l'indice de dommage progressif est de 2,88, qui montrent l'urgence de la préservation de cette façade. La façade Nord de la muraille de Tébessa présente un état avancé de dégradation avec $ID_{lineaire} = 2,26$ avec un $ID_{prog} = 2,4$. De ce fait la façade Nord est la plus touchés par la dégradation et elle requiert des travaux de restauration. En ce qui concerne la façade Est, elle est plus dégradée par rapport à la façade Sud mais moins dégradés par rapport à la façade Nord.

Le rapport ID_{lineaire} et ID_{progr} indique l'importance de l'évaluation quantitative des dommages enregistrés au niveau des pierres.

Tableau 5. 4 : Evaluation quantitative des indices de dommages des différentes façades de la Muraille de Tébessa et de la Basilique

	Catégorie 0	Catégorie 1	Catégorie 2	Catégorie 3	Catégorie 4	Indice des dommages linéaires	Indice des dommages progressifs
Sud	45,13	17,77	27,95	7,719	1,43	1,02	1,49
Nord	0	20,96	32,36	45,95	0,73	2,26	2,4
Est	26,26	33,19	14,43	18,28	7,85	1,48	1,95
Basilique	0,54	11,43	16,49	56,25	15,3	2,74	2,88

3. Comparaison de la dégradation entre les différentes façades

Les résultats obtenus pour les différentes façades et les types de pierres qui sont touchées par la dégradation sont reportés dans le Tableau 5.5.

Au niveau de la muraille Byzantine et de la basilique, les principales formes d'altération enregistrées sur les calcaires roses sont l'écaillage, salissure, croute blanche ainsi que la formation de fissures dans les parties basses de la façade Nord. La dégradation s'accroît en fonction de la hauteur des pierres par rapport au sol où l'alvéolisation devient la forme d'altération la plus dominante accompagnée de l'écaillage et aussi par certaines fissures. En comparant les trois niveaux d'hauteur inférieure, médiane, supérieur de ces calcaires dans cette façade, des différents gradients sont détectés en ce qui concerne les différents types de dommages et leur intensité. La forte dégradation de ce calcaire rose est observée à la base et au sommet de cette façade sous formes d'écaillage, d'alvéolisation et fissuration est une défaillance totale de la structure entraînant des dégradations sévères qui ne sont pas détectées sur les autres façades. La dégradation est moins intense dans la partie centrale de la muraille (3 à 5 m) au niveau de cette façade, où les pierres sont moins altérées. L'humidité, l'eau capillaire et l'eau de pluie semble être les facteurs qui jouent le rôle prépondérant dans la dégradation de cette façade où les parties humides présentent les surfaces les plus dégradées. Les tufs carbonatés qui sont représentés par quelques blocs et utilisés dans les parties médiane et supérieur de la muraille sont presque en bon état, cependant ils affichent quelque forme d'altération telle la perte de matière. En ce qui concerne les calcaires beiges, ils sont moins altérés que les calcaires roses et présentent seulement l'écaillage sur leurs surfaces. Très

souvent, des décolorations rouge-orangé peuvent être observées dans les parties bioturbées riches en oxydes de fer.

Le calcul de taux annuel de recul pour les calcaires roses est élevé dans les parties inférieures avec un taux de 0,04 mm/ans et dans les parties supérieures de la muraille avec un taux de 0,02 mm/ans. En ce qui concerne les calcaires beiges, leur taux de recul est de 0,01mm/ans avec des mêmes valeurs pour les tufs carbonatés.

La façade Est présente plusieurs formes d'altération qui sont contrôlées par le type pétrographique de la pierre. En effet, le tuf est le calcaire le plus endommagé qui est touché par plusieurs formes d'altération telles que le poudrage, fracturation à la base de la muraille, la dégradation décroît avec la hauteur. Les surfaces de recul des tufs carbonatés atteignent les 20 cm à moins de 3 m. Le recul touche en général les tufs avec un taux de 0,14 mm/ans dans sa partie basse qui présente un taux élevé par rapport aux autres types de pierres. Ce taux diminue jusqu'à atteindre un taux de 0,04mm/ans entre 3 à 5 m de hauteur. La pression générée par le poids de la structure semble être un facteur important de dégradation dans ce type de pierre en plus de l'action de l'eau. Pour le calcaire rose qui est la pierre la plus utilisée, la dégradation dans cette façade Est, est moins importante par rapport à la façade Nord où la surface de recul atteint les 2 cm. En ce qui concerne les calcaires beiges, ils sont affectés que par l'écaillage avec une surface de recul qui atteint rarement 1 cm, où le taux de recul estimé de 0,01mm/an qui est faible par rapport à celle des calcaires roses.

Au niveau de la façade Sud, la variété des pierres utilisées montre une multitude de formes d'altération avec des degrés différenciés où la plus importante dégradation touche le calcaire crayeux. Ce calcaire crayeux présente des formes d'altération telles : le poudrage, l'écaillage et l'alvéolisation. On remarque que sur cette façade, le calcaire crayeux présente une surface de recul qui atteint 10 cm avec un taux annuel de 0,07 mm/an. Pour les calcaires roses, les mêmes constatations sont observées sur les autres façades mais relativement avec une faible intensité. Le taux maximum de recul ne dépasse pas les 2 cm. L'écaillage affecte aussi les calcaires beiges qui sont moins dégradés et qui résistent mieux à la dégradation avec une surface de recul de 2cm.

Les données obtenues pour les taux annuels des surfaces de recul (mm/an) sont bien visibles lorsque ces valeurs sont calculées pour une durée d'une centaine d'année (mm/100ans) afin d'apprécier les valeurs de recul ou de perte de matière. Les façades Nord et Est sont les plus touchées par la dégradation, où les facteurs dégradants influant sont l'humidité, la pluie, l'eau capillaire et la température.

Tableau 5. 5 : Taux de récession, en relation avec les différentes façades et les différentes formes d'altération. T : tuf carbonatés, CR : calcaire rose, CB : calcaire beige, CC : calcaire crayeux, E : écaillage, Fr : fracture, A : alvéolisation, PM : perte de matière, S : salissure, EF : efflorescence, CB : croute blanche, C : coloration ; P : poudrage

Direction	Type de roche	Hauteur	Forme d'altération	Surface de récession (mm)	Taux (mm/ans)	Taux (mm/100 ans)
Nord	CR	<60cm	EF, S, E, C	60	0,04	4,17
	CR	60-3m	E, A, E, CB, C	60	0,04	4,17
	CR	3-5m	A, E, Fr	15	0,01	1,04
	CR	5-7m	A, E	30	0,02	2,08
	T	3-7m	PM	10	0,01	0,69
	CB		E	15	0,01	1,04
Est	T	<3m	P, Fr	200	0,14	13,9
	T	3-5m	P	50	0,04	3,47
	T	5-7m	E, PM	10	0,01	0,69
	CR	<3m	E, A	20	0,02	1,38
	CR	2-5m	E	7	0,01	0,49
	CR	5-7m	E, A	10	0,01	0,69
	CB	<7m	E	10	0,01	0,7
Sud	CR	<3m	A, E	20	0,02	1,39
	CR	3-5m	E	5	0,01	0,35
	CR	5-7m	E, A	10	0,01	0,7
	T	3-7m	B, PM	10	0,01	0,7
	CC	<7m	P, E, A	100	0,07	6,95
	CB	<7m	E	10	0,01	0,7

4. Caractéristiques pétrophysiques et minéralogiques des pierres de la muraille

Trois échantillons de calcaire rose issue de la façade de la Muraille et trois échantillons de tuf carbonaté issue de la façade Est ont été prélevés par une carotteuse. Ces échantillons sont étudiés pour connaître leur propriété pétrophysique et leur variation minéralogique par rapport à leur état sain dans la carrière.

4.1. Masse volumique sèche

Les résultats de mesure de la masse volumique moyenne des pierres dégradées étudiés sont représentés dans le tableau 5.6. En effet la masse volumique moyenne de calcaire dégradé est de 2,46 g/cm³ qui est nettement inférieure à celle d'un calcaire rose de même type à l'état intact avec une valeur moyenne de 2,58 g/cm³.

Tableau 5. 6 : Valeurs de la masse volumique sèche et à l'état saine et dégradée de calcaire et de tuf carbonaté

Type de pierre	Calcaire	Tuf carbonaté
Masse volumique sèche (Pierre dégradée) (g/cm ³)	2,46 ± 0.01	1,37 ± 0.09
Masse volumique (Pierre saine) (g/cm ³)	2.58 ± 0.02	1.47 ± 0.12

4.2. La porosité ouverte

Les valeurs moyennes de la porosité ouverte des pierres dégradées extraite de la muraille byzantine et de la Basilique sont montrées dans le tableau 5.7.

La dégradation ne semble pas avoir un effet remarquable sur la porosité car sa valeur dans les deux états sont très proches. La valeur élevée de la porosité pour les calcaires dégradés comparer à la même pierre dans son état intact saine est dû principalement à la formation de nouveau réseau poreux et l'interconnexion de certains pores isolés auparavant, aussi l'apparition des fissures augmente le volume des pores et de la porosité. Ceci est vrai pour les tufs carbonatés qui présentent un taux marquant de la valeur élevée de porosité (Tab 5.7) qui est dû à la perte de matière de son réseau poreux.

Tableau 5. 7 : Valeurs de la porosité ouverte dans des pierres saines et dégradées

Type de pierre	Calcaire	Tuf carbonaté
Porosité (pierre dégradée)	4,92± 1.42	45.03± 3.03
Porosité (pierre saine)	4.48 ± 1.02	44.37 ± 2.5

4.3. Porosimétrie au mercure (MIP)

Si on considère que le réseau poral se développe suite à l'altération, la porosimétrie au mercure a montré que la porosité de calcaire rose sain de taille porale comprise entre 0,001 à 0,01 µm est absente comparer à une pierre intacte de même type (Figure 5.6). L'explication réside dans l'ouverture de ces pores par la fissuration ou par l'obstruction des pores par des substances salines peu argileuses colmatant le réseau poreux en partie suite au processus de dégradation avant qu'elles soient évacuées par l'eau drainées.

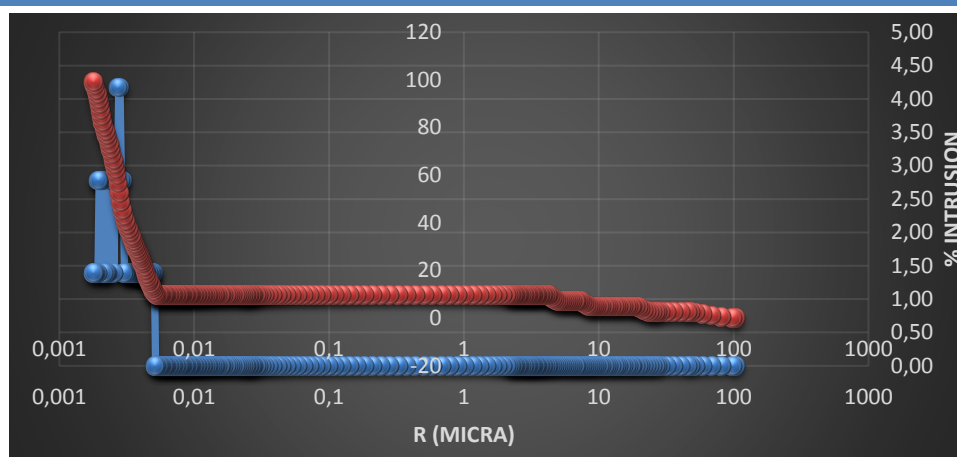


Figure 5. 6 : Valeurs de porosimétrie au mercure d'un calcaire dégradé

4.4. Caractérisation minéralogique (DRX)

Les résultats obtenus pour la diffraction des rayons X sur les pierres montrant différentes formes d'altération sont représentés dans la figure 5.7 et l'annexe. Le Tableau 5.8 concerne les phases minérales recensées dans des pierres dégradées de la muraille et de la Basilique et des pierres saines extraites des carrières sources. En effet 10 échantillons de calcaire rose ont été analysés et 2 autres pour les tufs carbonatés (Annexe). Les minéraux salins sont les plus dominants avec des concentrations variées selon les formes d'altération étudiée. En générale, le gypse et l'halite sont les deux minéraux les plus apparents sur les surfaces dégradées. Le gypse se trouve associé à toutes les formes d'altération sévère soient l'écaillage, les croûtes blanches et les subefflorescences. Pour l'halite on la trouve généralement derrière les écailles avec un aspect de subefflorescence.

Tableau 5. 8 : Minéralogie des pierres saines issue des carrières et dégradés sous DRX

Echantillon non-dégradé (Carrières d'extraction)			
	Localisation	Minéralogie primaire	Minéralogie secondaire
Calcaire Rose	Carrière de Dj. Doukkane	Calcite	Quartz, Dolomite et goethite
Tuf carbonaté	Carrière Dj. Djoua	Calcite	–
Echantillons dégradés prélevés des monuments			
Formes d'altération	Localisation	Produit de dégradation	
Ecaillage	Façade Nord de la muraille	Gypse	
Subefflorescence	//	Gypse	
Croûte blanche	//	Gypse	
Ecaillage et subefflorescence	//	Gypse et Halite	

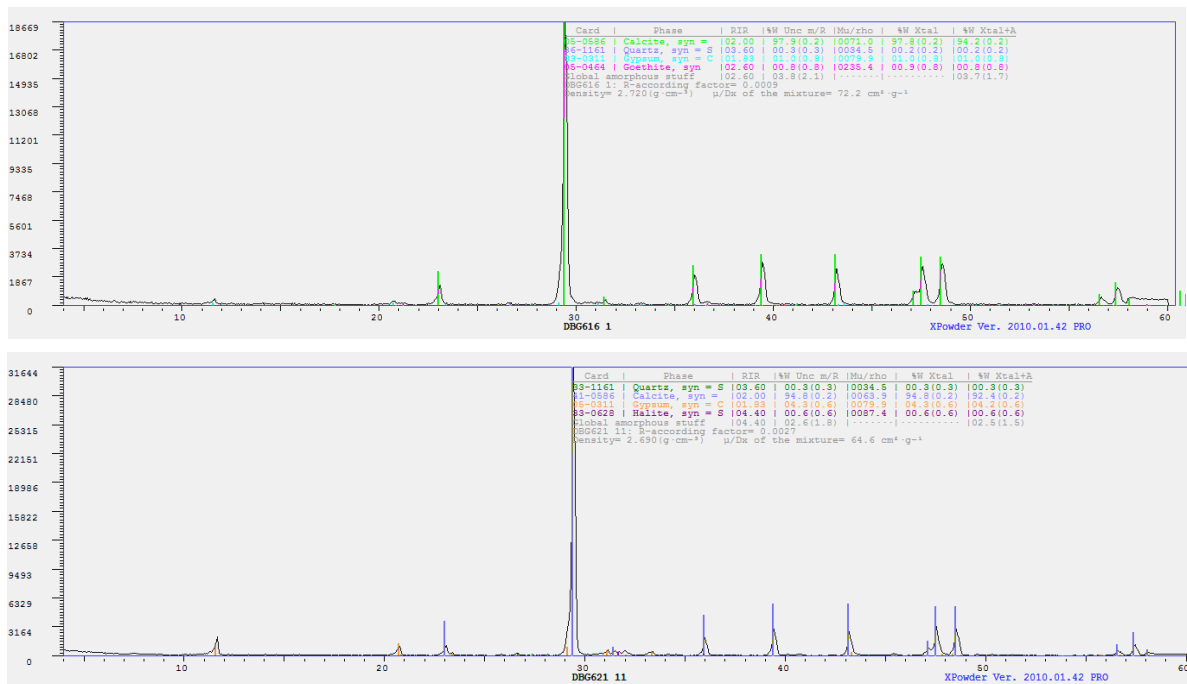


Figure 5. 7 : Diffraction des rayons X de différents échantillons de surface dégradée de calcaire rose

4.5. Concentration de sels selon la localisation des pierres

Les résultats de la distribution de la quantité de sels et de type de sels sont reportés dans le Tableau 5.9. Le Gypse est le sel sulfaté le plus dominant avec des concentrations qui varient selon la position des pierres dans la muraille. La première rangée de pierre, à la base de la muraille, présente un taux de 1 %, cette valeur augmente dans la deuxième et troisième rangée de pierre soit entre 0,6 à 2 m de sol. La faible valeur dans la première rangée est due au lessivage continu des sels contenus dans la pierre soit par les remontées capillaires ou lessivage par les eaux de pluie battante. La diminution de la concentration à partir de 2 m est due aux forces capillaires qui ne peuvent atteindre des hauteurs et de l'humidité continue qui peut être observé surtout dans la façade Nord. L'halite est présente à une hauteur de plus de 1,20 m ou les eaux ne peuvent enlever les cristaux qui se forment en générale sous les écailles (Subefflorescence). Plus il y'a présence d'humidité plus en remarque la présence d'une dégradation prononcée.

Tableau 5. 9 : Types et teneurs des sels en fonction de la hauteur par rapport au sol

Hauteur (m)	Calcite %	Dolomite %	Gypse %	Halite %	Goethite %	Quartz %
0 à 0.6	97,8		1		0,9	0,2
0 à 0.6	96,7		2,8			0,5
0.6 à 1.20	96,5		3			0,5
0.6 à 1.20	94,5		3,3		0,8	1,3
1.20 à 2	94,8		4,3	0,6		0,3
2.60 à 3	96,1	1,5	1,1	0,9		0,5

4.6. Caractérisation texturale (SEM-EDX)

L'analyse par diffraction des rayons X et au MEB a révélé que les matériaux efflorescents, les croûtes blanches et les matériaux dans les fissures inter-écailles sont composées de gypse et d'halite. Les cristaux de gypse sont orientés sous différents angles par rapport aux parois des vides (Figure 5.8). Les cristaux d'halite présentent des formes de dissolution (corrosion) liées aux cycles de dissolution-précipitation à la surface de la pierre. Des cristaux, qui sont de fins fragments de matériau qui se détachent lorsque le sel cristallise sous ses derniers, sont principalement composés de gypse. Le détachement de ces cristaux suggère des fluctuations rythmiques dans l'apport de la solution et la cristallisation de ces sels (Kramar et al., 2010). Les fissures ont une épaisseur de 100 à 200 μm et sont orientées dans différentes directions par rapport à la surface. Les fissures superficielles contiennent des oxydes de fer et des minéraux argileux, réduisent la résistance de la pierre. Le flux d'eau et de solutions salines affaiblit les plans et le gonflement cyclique de l'argile contribue à la fissuration et au délaminage de la pierre (Rodriguez-Navarro et al., 1997; Sebastian et al., 2008).

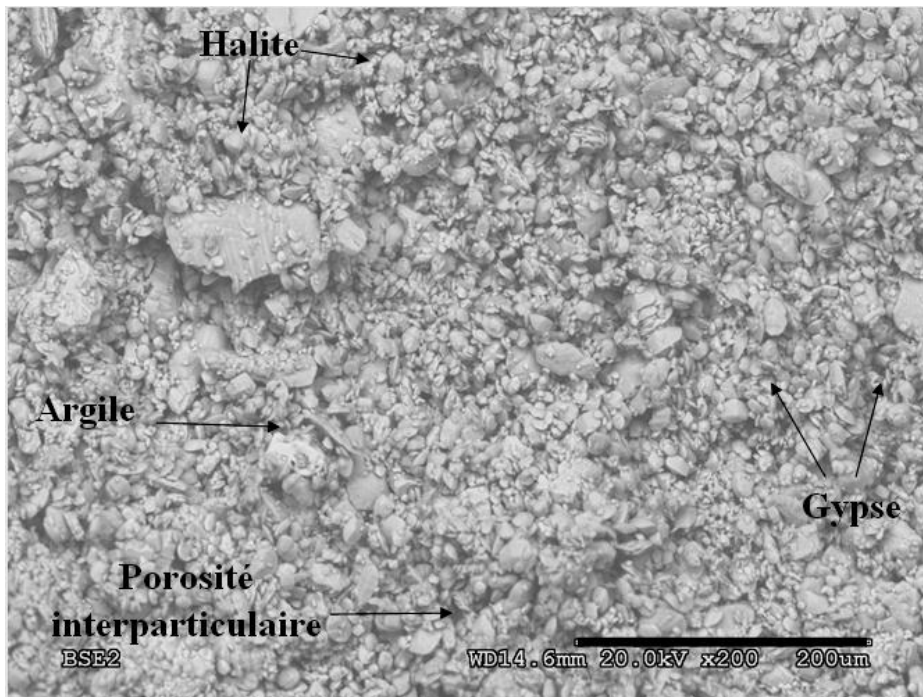


Figure 5. 8 : Image sous SEM d'une surface dégradée de calcaire rose au niveau de la façade Nord sur une écaille.

4.7. Cartographies élémentaires (EDX) :

La microanalyse par dispersion d'énergie des rayons X (EDX) sur une surface dégradée obtenue d'un échantillon ou d'écaillage prélevé sur un calcaire rose a permis de cartographier la répartition des éléments constitutifs du matériau en relation avec la porosité. La répartition des éléments chimiques tels : le calcium, le silicium, l'aluminium, le fer et le soufre montre que le Soufre et le sodium remplissent les pores (Planche 5.4). Le soufre est l'élément dont la répartition est la moins homogène. Cet élément se caractérise par sa présence au niveau des pores avec des tailles allant jusqu'à 50 μm . Cette constatation de la fermeture des pores est confirmée par les résultats de MIP lors de la décroissance de la taille des pores dans les pierres dégradées.

Le Sodium et le chlore occupent la même surface ce qui pousse à suggérer qu'ils forment un minéral spécifique qui est l'halite (NaCl) avec une taille allant jusqu'à 40 μm . Dans cette zone les signaux du Sodium et de chlore sont plus présents que dans le reste de l'échantillon. De plus, le signal du soufre diminue régulièrement sur plus d'un millimètre pour ne plus être présent que par quelques pics qui forment des grains de gypse isolés. En effet, cette étape est le début de la formation d'écaillage (Rautureau, 2001; Brunet-Imbault, 1999; Beck, 2007).

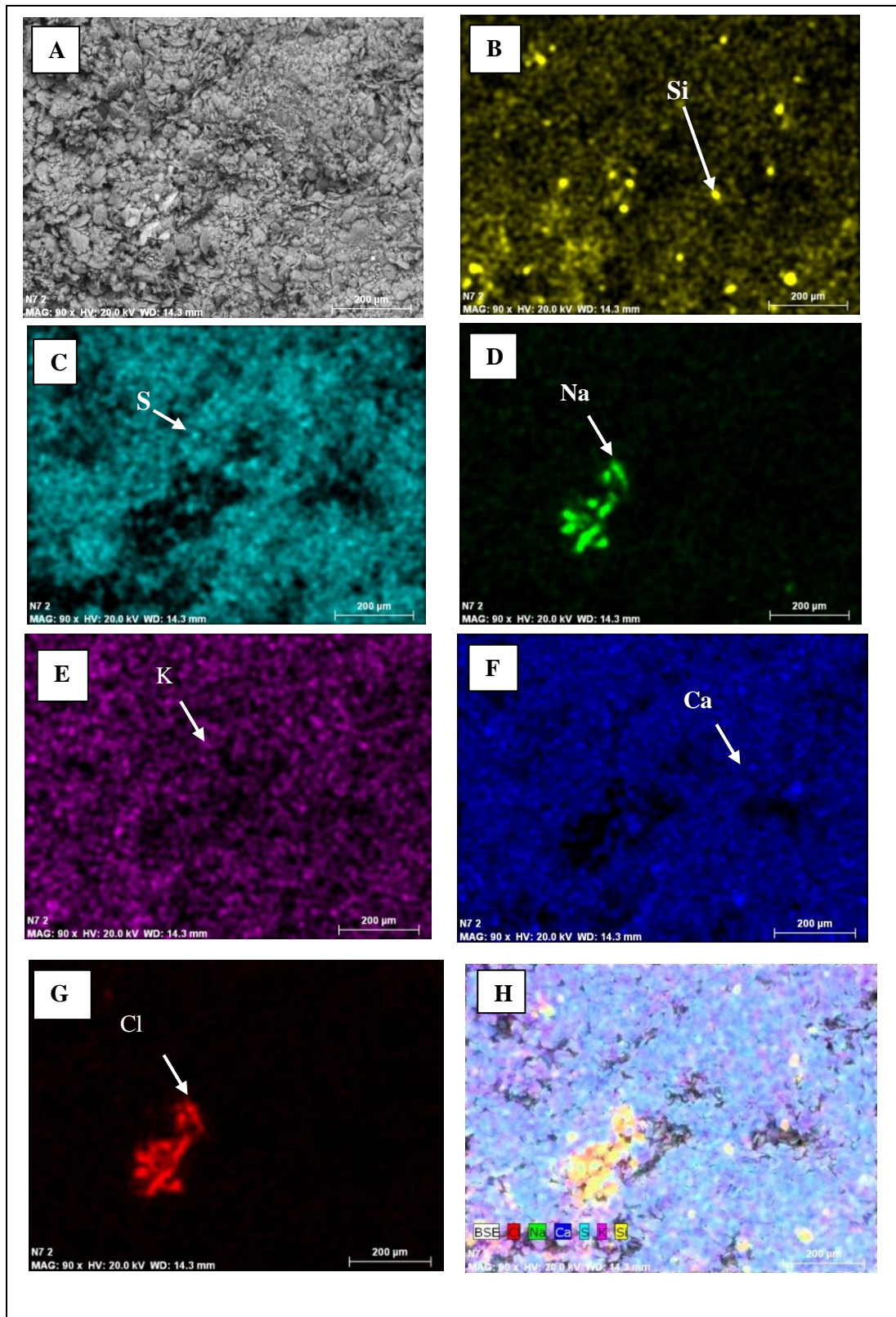


Planche 5. 4 : Cartographie élémentaire par analyse EDX sur une surface de calcaire rose dégradé (A) avec la distrucbution des éléments chimiques tels que le : Si : Silicium (B), S : soufre (C), Na : sodium (D), K : potassium (E), Ca : calcium (F), Cl : chlore (G) et distribution de tous les éléments chimique sur une surface dégradé (H).

4.8. Marteau de Schmidt

4.8.1. Principe

Le marteau de Schmidt est un essai non-destructif qui peut être appliqué in-situ facilement et efficacement. Il est utilisé sur les surfaces dégradées et saines en accord avec la norme ISRM (1978) et les recommandations de ASTM (2001). La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un marteau (commandé par un ressort). La distance parcourue par le piston après le rebond (exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort-clé) s'appelle le nombre de rebond (VR), considérée comme un indice de dureté de surface.

4.8.2. Résultats

La figure 5.9 montre les nombres de rebond du marteau de Schmidt obtenus sur des surfaces dégradées et non dégradées. Les valeurs obtenues avec l'essai de marteau de Schmidt indiquent des modifications de la résistance des surfaces dégradées et non dégradées, sans aucune information spécifique sur les caractéristiques de la dégradation (Seidel et al., 2011).

Les calcaires roses sains présentent des nombres de rebond élevés sur leurs surfaces par contre les surfaces dégradées présentent des nombres inférieurs à ceux enregistrés sur des surfaces saines. Les tufs carbonatés quant à eux présentent les mêmes résultats où les surfaces saines présentent un nombre de rebond plus élevé comparé à une surface dégradée de ce dernier. Plus précisément, la résistance superficielle diminue en raison d'une perte de cohésion entre les grains.

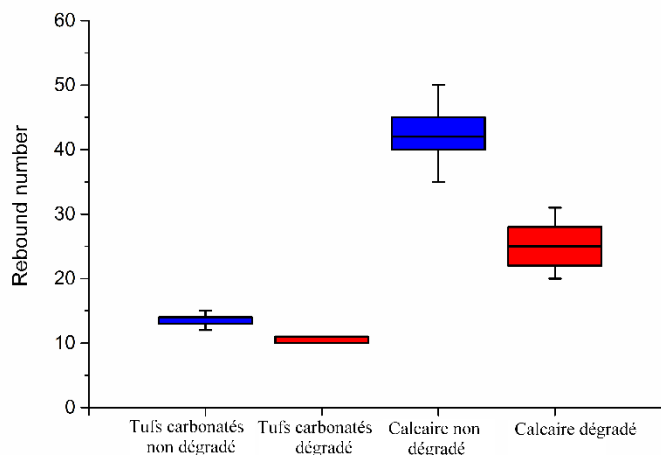


Figure 5. 9 : Valeurs de nombre de rebonds sur des surfaces de calcaire rose sain et dégradé, et de tuf carbonaté sain et dégradée.

4. Conclusion

Une étude approfondie de la dégradation est requise pour la caractérisation, l'interprétation, et les prévisions des dégradations dues à l'interaction de l'environnement et des pierres mises en œuvre sur les monuments. Cette étude est vitale pour la durabilité et la conservation des monuments. La cartographie des monuments est une procédure scientifique moderne pour une étude in-situ de l'évaluation de la dégradation.

Les cartographies réalisées ont permis de localiser les formes d'altérations présentes sur les façades étudiées, et de corréliser ces informations avec d'autres éléments comme les conditions environnementales.

Les pierres utilisées au niveau de la muraille présentent une multitude de formes d'altérations telles que l'écaillage, alvéolisation, croute blanche, fracture, salissure, perte de matière, fissuration etc. L'écaillage est une forme d'altération liée toujours à l'alvéolisation qui constitue sa première phase de formation. Le calcaire rose est la pierre la plus touchée par la dégradation et ça a été montré par le taux de recul des surfaces, surtout dans la façade Nord. Dans les autres façades, la dégradation est moindre pour ce type de calcaire. Les bioturbations semblent être la faiblesse des calcaires roses à cause de leur minéralogie et porosité.

Le tuf carbonaté montre une dégradation avancée lors de son utilisation dans la base de monument dû aux charges appliquées, tandis que les pierres sont saines dans les parties supérieures de la Muraille Byzantine. Les dommages moyens et sévères sont les plus importants surtout dans la façade Nord. Les indices de dommages linéaires et indices de dommages progressifs montrent l'état alarmant de la dégradation au niveau de la façade Nord de la muraille Byzantine et de la Basilique.

Les propriétés pétrophysiques mesurées des pierres dégradées diffèrent par rapport aux mêmes types de pierres saines. La masse volumique de ces pierres diminue ce qui est en rapport avec la perte de matériaux et présence de la fissuration. Cette diminution est accompagnée par l'augmentation de la porosité des deux pierres. Les formes d'altération génèrent une perte de cohésion des grains cela est corroboré par la variation de nombre de rebonds de marteau de Schmidt ce qui montre la résistance des surfaces saines et dégradées. La dégradation qui touche les pierres de la muraille est due principalement à l'action saline du gypse et de l'halite. Ces sels sont actifs jusqu'à 3 m au-dessus de sol, ce qui sera probablement en relation avec la remontée capillaire et à l'action des pluies. L'action d'humidification-séchage est un processus important dans la région vu le climat semi-aride où la façade Nord est la plus touchée.

Enfin, des mesures de préservation et restauration doivent être prise surtout dans la façade Nord et Est pour le calcaire rose et tufs carbonaté. Ces mesures se feront par le remplacement des pierres les plus dégradés et protection des pierres les moins dégradés par rapport à la condition environnementale de la région.

Chapitre 6 : Essais de vieillissement accéléré

1. Introduction

Les sels, particulièrement les sulfates sont connus pour être les agents les plus destructeurs dans les pierres, mortier et briques (Goudie et Viles, 1997; Angeli et al., 2007; La Russa et al., 2008; Belfiore et al., 2012). De ce fait, leur étude, est très importante pour comprendre les processus de cristallisation saline qui surviennent dans le réseau poral de la pierre et de proposer aussi des moyens pour prévenir et limiter les dommages dans ces matériaux. Les dommages causés par la cristallisation saline dépendent principalement de la quantité des sels dans la pierre et des caractéristiques de réseau poral (Steiger, 2005).

Selon plusieurs auteurs (Livingstone, 1988; Bell 1992; Dessandier et al., 2002; Angeli et al., 2007; Hoffmann and Siegesmund 2007), le concept de durabilité est une propriété de matériaux qui illustre sa résistance et sa capacité à de conserver le plus longtemps possible l'ensemble de ses propriétés, à l'échelle des temps historiques. Il est connu, que dans un environnement donné, la durabilité est contrôlée par des facteurs internes et externes tels les conditions environnementales et les propriétés minéralogiques et texturales. Deux méthodes permettent d'évaluer la durabilité des matériaux : les essais d'exposition sur sites et les essais de vieillissement accélérés en laboratoire.

Pour cela, ce chapitre est consacré exclusivement à l'évaluation du comportement au laboratoire des deux pierres étudiées calcaire rose et tuf carbonaté durant le test de vieillissement accéléré. En outre, l'observation des changements externes et internes qui sont dus à la variation des propriétés de la pierre telles que la masse, porosité, vitesses des ondes ultrasoniques et l'observation des formes d'altération.

Les tests de vieillissement accélérés ont pour objet de suivre les variations de l'état du matériau et de permettre une évaluation prédictive de leur durabilité. Cet essai de laboratoire est un outil susceptible d'apporter des informations précises pour la connaissance de matériaux mis en œuvre afin de mieux comprendre les mécanismes de dégradations qui entre en jeu et déterminer les variations des propriétés physiques et mécaniques de la pierre ; ainsi que l'étude des causes principales des morphologies des dégradations qui induisent des formes d'altération.

Cependant, les mécanismes qui conduisent à l'altération d'un matériau poreux par les sels solubles ne sont pas encore bien établis et ce malgré le nombre croissant de travaux de recherche et d'études (Benavente et al., 2001, 2004, 2007; Cardell et al., 2003; Flatt, 2002; Nicholson, 2001; Scherer, 1999; Tsui et al., 2003). Du point de vue conservation du patrimoine, la compréhension des mécanismes de dégradation de la pierre par les

crystallisations salines permet d'améliorer les méthodes de diagnostic et surtout les techniques de conservation des matériaux affectés par le sel.

2. Essai de vieillissement accéléré

L'essai de vieillissement accéléré sur les calcaires roses et les tufs carbonatés a été effectuée, selon la norme EN 12370 (1999) pour l'étude de la résistance et de la durabilité de ces pierres à la cristallisation des sels dans les pores. Ce test concerne des pierres saines extraites des carrières et coupée en forme de cubes $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ avec six échantillons par type de pierre (12 cubes au total). Le test se fait en 15 cycles (Figure 6.1).

Chaque cycle dure 24 h :

- 2 heures d'immersion dans une solution saturée par rapport au sulfate de sodium (Na_2SO_4) (14% en poids) (20-25 ° C, 40-55% Humidité relative),
- 18 heures de séchage à 105 ° C.
- 4 heures de refroidissement à la température ambiante.
- Ces échantillons sont pesés après chaque cycle avec une balance d'une de précision ($\pm 0,01 \text{ g}$).

Pour identifier l'évolution de la dégradation : la taille, les masses et les formes d'altération des échantillons sont mesurés après chaque cycle complet. La vitesse des ondes ultrasoniques a été mesurée avant l'essai et à la fin de l'essai afin de garder les échantillons propres pour les protéger contre le gel utilisé pour l'homogénéisation des surfaces. Le volume et la masse saturée sont mesurés avant et après l'essai dans le but d'estimer l'évolution de la masse volumique et de la porosité du matériau.

A la fin de l'expérience, les paramètres pétrophysique des pierres sont mesurés tels : la porosité et la masse volumique qui sont mesurées après avoir lavé les échantillons à l'eau.

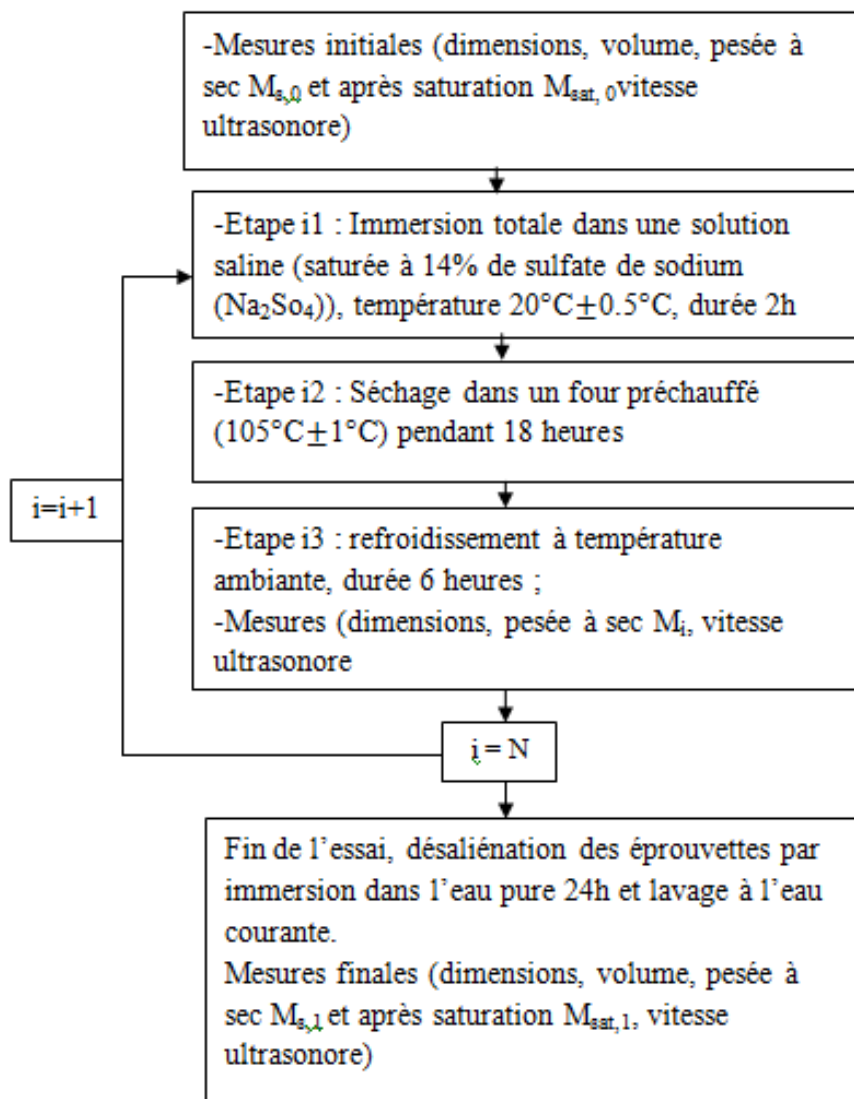


Figure 6. 1 : Protocole d'essai pour l'essai de cristallisation de sel

3. Résultats

3.1. Changement morphologique (formes d'altération)

Les échantillons de pierres soumis à l'essai sont inspectés visuellement après chaque cycle, comparé à l'état sain avant le début de l'essai (Planche 6). Les signes de dommages commencent à apparaître à partir de 5^{ème} cycle. Les efflorescences de sel appariassent sur tous les échantillons et sont facilement détachable par de l'eau, où d'autres formes d'altération commencent à apparaître notamment l'écaillage. Cette absence de dégradation au niveau de ces calcaires roses est due probablement à la faible quantité de la solution saline interstitielle dans les pores qui n'est pas encore assez importante pour produire des phénomènes de

crystallisation et de pression. Des fissures commencent à apparaître sur la surface des calcaires roses à partir de 6^{ème} cycle. Ces fissures sont probablement l'ouverture des microfissures originales non visibles. La mise en évidence de cette fissuration pourrait être expliquée par les pressions générées par les cristaux de sels dans les microfissures et dans les bioturbations. Les microfissures apparaissent quand la concentration des sels dans la solution interstitielle aurait atteint le point de saturation nécessaire pour engendrer des pressions de cristallisation, capable d'ouvrir des fissures. A partir de 7^{ème} cycle, la désagrégation granulaire commence à apparaître surtout dans les bioturbations. L'intensification de la microfissuration commence dès le 10^{ème} cycle. A partir de 11^{ème} cycle, les fissures apparues durant les cycles précédents commencent à s'élargir et prendre de l'ampleur pour se transformer en fracture de quelque millimètres d'ouverture qui fracture et désagrège complètement certains échantillons.

La décoloration est observée dans les bioturbations où leur teinte rose commence à s'accroître et devenir rougeâtre. L'accentuation de la teinte rose vers une teinte foncée commence à se faire remarquer surtout au niveau des bioturbations qui sont riches en oxydes de fer et qui est dû au contact de ces oxydes avec la solution saline. Cette teinte rougeâtre se propage autour des zones bioturbées, suite au déplacement des particules de fer oxydé par l'humidification.

Concernant les tufs carbonatés, aucune dégradation n'est visible à leur surface avant le 8^{ème} cycle. Des efflorescences apparaissent à la surface des tufs carbonatés qui n'affectent nullement la structure des pierres à partir de 2^{ème} cycle. En effet des cristaux de sels de couleur blanche sont exhibés à la surface de ces pierres et ça à partir de 2^{ème} cycle. L'absence de dégradation est due principalement à la faible pression générée par la cristallisation des sels qui n'est pas assez forte pour induire des dégâts sur ce type de pierre à porosité élevée. A partir du 8^{ème} cycle commence la désagrégation granulaire accompagnée de poudrage à partir de la surface. Cette désagrégation est expliquée par la perte de cohésion entre des grains, causée par les pressions générées par les sels et la faible résistance de la pierre. Ces dégâts sont due à l'action des sels cristallisant dans les pores engendrent des pressions sur les vides des tufs carbonatés. Ainsi l'examen visuel nous permet de constater que les échantillons subissent un processus de dégradation par une désagrégation granulaire.









Numéro de cycle	Calcaire rose	Tuf carbonatée
1 ^{er} cycle		
7 ^{ème} cycle		
11 ^{ème} cycle		
15 ^{ème} cycle		

Planche 6 : Changement morphologique des pierres de taille calcaire rose et tuf carbonaté durant les cycles de cristallisation saline

3.2. Perte de masse

Le facteur permettant d'estimer les principales caractéristiques de la dégradation du matériau à l'échelle des échantillons (début de la dégradation, principales étapes de la dégradation, vitesse de la dégradation) est la perte de matière ou la perte de masse. La figure

6.2 montre l'évolution de la masse des échantillons avec le nombre de cycles pour mettre en évidence les différentes étapes de dégradation :

Phase 1 : L'augmentation de la masse est observée sur la plupart des échantillons jusqu'au 8^{ème} cycle. Cette augmentation de la masse est due principalement à la précipitation des sels dans le réseau poreux. L'accroissement de la masse suite à l'absorption de sel est de l'ordre de 1% de la masse initiale des échantillons. Cet accroissement se limite aux 5 premiers cycles pour la plupart des échantillons calcaires roses. En ce qui concerne les tufs carbonatés, l'accroissement de masse est de l'ordre de 1% jusqu'au 7^{ème} cycle. A ce stade, les échantillons n'ont subi aucune dégradation visible.

Phase 2 : Cette phase concerne principalement les variations de la masse qui dépendent principalement de la perte de matière et de la quantité de sel à l'intérieur de la pierre (Angeli et al., 2007). Cette variation est observée sur les échantillons de calcaires roses étudiés à partir de 6^{ème} cycle. En effet, durant cette étape la quantité des sels précipités dans la pierre est inférieure à la quantité de la matière perdue par ce dernier ce qui induit une perte remarquable de la masse. Cette étape débute au 6^{ème} cycle pour les calcaires roses et jusqu'au 8^{ème} cycle pour les tufs carbonatés. Les formes d'altération qui apparaissent lors de cette phase est l'écaillage et perte de matériaux avec la fissuration pour les calcaires roses.

Phase 3 : C'est la phase de la perte de la masse où la quantité des sels cristallisés dans l'espace porale est négligeable par rapport à la perte de la matière. L'étape de la diminution de la masse commence pour les échantillons de calcaire rose à partir de 10^{ème} cycle et pour d'autres échantillons à partir de 8^{ème} cycle. Ce décroissement continue jusqu'à la fin de l'essai. Le sel attaque les couches superficielles pour provoquer la dislocation et former des écailles et la désagrégation des grains constitutifs qui sont libérés à chaque immersion et exposant ainsi les couches sous-jacentes. Un échantillon a été complètement détruit après le 11^{ème} cycle suite à l'élargissement d'une fissure. La fissuration importante est du probablement au gonflement des argiles contenues au niveau des microfissures détecter par SEM/EDX (cf. Chapitre 4). Pour les tufs carbonatés, la diminution de la masse est équilibrée par la pénétration continue des sels à l'intérieur de la pierre à partir de 11^{ème} cycle. Cette pénétration est importante vu la grande importance de réseau poreux. La pression générée par les sels est moins importante dans les grands pores ce qui laisse de l'espace pour le dépôt des quantités de sels.

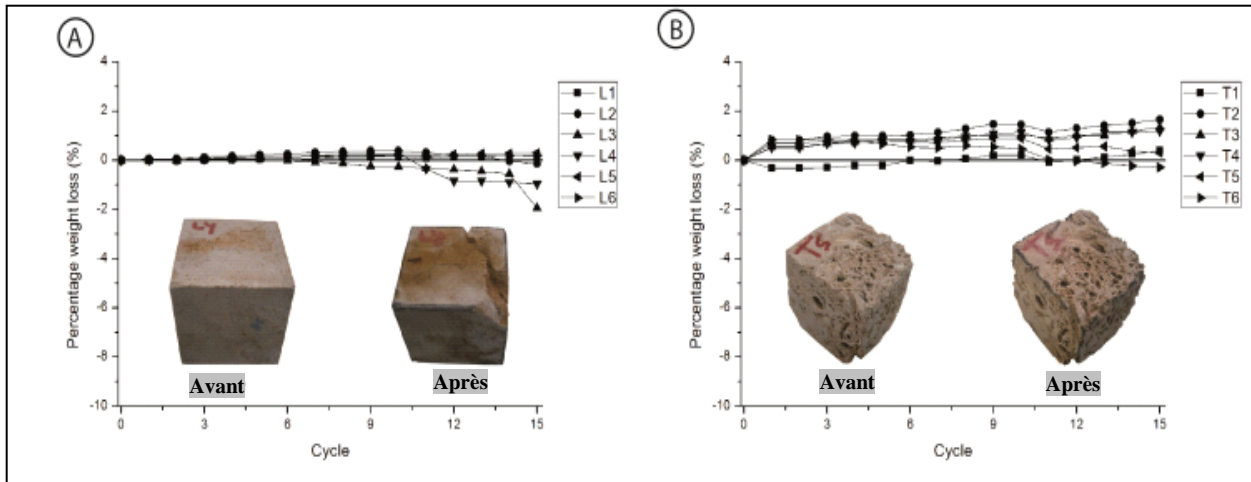


Figure 6. 2 : Essai de vieillissement accéléré : courbe de variation de la masse en fonction de chaque cycle de cristallisation saline avant et après le test pour le calcaire rose (A) et le tuf carbonaté (B)

3.3. Masse volumique et Porosité :

Le tableau 6 montre les changements de la masse volumique avant et après l’essai de vieillissement. La diminution des masses volumiques entre l’état sein des pierres et l’état dégradé signifie la perte de matériaux des deux pierres testées. Cette diminution est bien visible sur le changement des morphologies des surfaces et les changements de masses. Ils confirment les résultats obtenus sur les pierres issues de carottage au niveau de la muraille (cf. Chapitre 5). En ce qui concerne la porosité, son augmentation pour les deux pierres et dû vraisemblablement à la perte et à l’évacuation des composants de la pierre vers l’extérieur sous l’influence des sels et la formation des fissures. Cette augmentation est bien prononcée au niveau des calcaires roses par rapport aux tufs carbonatés. Les pressions générées par les cristaux des sels sont importantes aux niveaux des calcaires roses qui présentent une faible porosité (6,33%). Au contraire, la porosité élevée des tufs carbonatés (54,82%) montre une meilleure résistance aux pressions générées par la croissance des sels.

Tableau 6 : Propriété pétrophysique avant et après le test de cristallisation saline pour le calcaire rose et le tuf carbonatés.

	Calcaire rose		Tuf carbonaté	
	Avant	Après	Avant	Après
<i>Masse volumique (g/cm³)</i>	2,58	2,47	1,47	1,45
<i>Porosité totale (N_t) (%)</i>	6,23	8,45	54,82	55,44
<i>Porosité ouverte(%)</i>	4,48	4,66	44,37	42,9
<i>V_p (m/s)</i>	5949,35	5915,9	3605	3600

3.4. Propriétés ultrasoniques

Les mesures des ondes ultrasoniques sont appliquées pour vérifier l'effet de la dégradation en fonction de la vitesse de l'onde P entre l'état sain et l'état final dégradé. De légères variations des ondes ultrasoniques entre l'état initial et final indiquant qu'un changement au niveau de la texture de la pierre s'est produit (cf. Tableau 6).

Le calcaire rose qui présente une faible porosité montre une augmentation de la porosité après l'essai de la cristallisation saline reflété par la diminution des vitesses des ondes ultrasoniques. Pour les tufs carbonatés, l'augmentation de la porosité par rapport à l'état sain fait diminuer la vitesse des ondes ultrasoniques.

4. Discussion des résultats

Au niveau de la muraille Byzantine et de la Basilique romaine, les sulfates sont la cause principale des dégradations observées. L'évaluation des propriétés des calcaires roses sains et des tufs carbonatés extraient des carrières est estimée contrôlée au moyen de cinq essais : (1) perte de masse de l'échantillon, (2) changement de morphologie, (3) vitesse des ondes ultrasonique, (4) masse volumique et (5) porosité. Les trois derniers paramètres ont été pris en considération dans cette étude pour comparer les variations des propriétés pétrophysiques et évaluer le degré de dégradation. La Figure 6.2 précédente montre les variations en perte de masse après chaque cycle du test de vieillissement salin effectué sur des échantillons non traités et sain. En général, le tuf carbonaté présente une excellente durabilité contre l'attaque saline par rapport au comportement du calcaire rose, de telle sorte que les échantillons de tuf carbonaté sont structurellement sains à l'échelle moyenne, tandis que les échantillons de calcaire rose montrent différents types de formes d'altération.

En raison des cristaux de sel à l'intérieur de réseau poral, les masses des échantillons de calcaires roses augmentent initialement jusqu'à atteindre un seuil où la masse commence à diminuer et les échantillons indiquent des états de dégradation. Cette dégradation est indiquée par la présence de plusieurs formes d'altérations telles que l'écaillage, fracturation et désagrégation granulaire surtout dans les bioturbations et les efflorescences. L'écaillage entraîne la perte de feuilles épaisses à la surface des échantillons d'ordre millimétrique. La coalescence des différentes fissures peut engendrer des fractures entraînent la désagrégation des échantillons et générant des éclats (débris). La formation des fractures implique à la fois l'initiation et la propagation de fissures préexistantes ou l'apparition de nouvelles fractures (Nicholson, 2001). En effet, ces fractures se manifestent par l'augmentation de la porosité ouverte et la diminution de la masse volumique après le test de cristallisation saline. Les

variations sont faibles dans les deux types de pierre étudiée. Dans le calcaire rose, cette faible variation est contrôlée par les fissures et les pertes de matériaux. Une augmentation de la densité des fissures augmente également l'absorption d'eau capillaire, ce qui rend les dégradations plus sévères (Eppes et Keanini, 2017). Selon Thomachot et Jeannette (2002), les cycles d'humidification/séchage peuvent augmenter la densité du réseau poreux qui peut entraîner des dommages au sein des matériaux.

La décoloration est une autre forme d'altération qui apparaît sous forme d'une accentuation de couleur dans les structures bioturbées. La décoloration est provoquée par l'oxydation de fer dans l'eau lors du test de vieillissement accéléré. Cette couleur ocre se propage autour de la surface des bioturbations et entraîne l'apparition de la désagrégation granulaire. L'oxydation de fer associé avec ces bioturbations augmente la porosité locale et diminue la cohésion de la roche (Akin et Özsan, 2011; Benavente et al., 2018). Le test de durabilité montre l'importance de ses bioturbations, observées dans les échantillons (L3 et L4) (cf. Figure 6.2). En conséquence, ces échantillons se caractérisent par une dégradation relativement élevée, ce qui se traduit par une désagrégation granulaire et la formation de la fracturation. À la fin du test, les calcaires roses montrent une perte de masse d'une moyenne d'environ 1%.

De plus, les échantillons de tuf carbonaté montrent une augmentation soudaine de la masse après le premier cycle car la quantité de sel retenue à l'intérieur de la pierre est facilement déposée sans aucun effet destructeur. Les échantillons ne subissent aucune dégradation, et une réduction de leur masse n'est observée que dans un seul échantillon, dans lequel on observe un petit décollement des grains à la surface après le 1^{er} cycle. La pression générée par les cristaux de sel n'est pas suffisante pour causer des dommages importants à ce type de pierre, car les pores sont assez gros pour contenir les pressions générées par la croissance de sels, ce qui peut être confirmé par le gain de la masse de 1%. La diminution de la porosité des tufs carbonatés peut-être expliqué par les cristaux de sel qui se forment à l'intérieur du réseau poral, ce qui est indiqué par l'augmentation de la masse volumique (Tableau 6) et l'augmentation de la masse sans aucune dégradation après le test de vieillissement accéléré.

L'évolution de la résistance mécanique telle que quantifiée par V_p après le test de durabilité n'est pas significative et, dans la plupart des cas, la variation est comprise entre les valeurs maximales et minimales des échantillons dégradés et non dégradés. Par conséquent, les petites variations des paramètres ultrasoniques corroborent le fait que le nombre et le

degré de développement des fissures internes est insuffisant pour provoquer ces dégâts et être détectés par cette technique.

Au cours de la phase de séchage du test, le comportement de la dilatation thermique est contrôlé partiellement par les propriétés monocristallines (Malaga-Starzec et al., 2002), car la calcite influence fortement les dégradations du fait de l'anisotropie du coefficient de dilatation thermique de différents axes de ces minéraux (Eppes et Griffing, 2010). Par conséquent, l'expansion et la contraction des minéraux dans la pierre induisent l'apparition de fissures et de fractures qui affaiblissent et accélèrent les dégradations, en particulier dans les calcaires roses à porosité fine (Gomez-Heras et al., 2009; Benavente et al., 2018). Par conséquent, le calcaire rose et le tuf carbonaté présente différents mécanismes de dégradation. Bien que la résistance mécanique du tuf carbonaté soit inférieure à celle du calcaire rose, le tuf carbonaté résiste mieux à l'action de cristallisation saline (Benavente et al., 2018). La sensibilité de la roche poreuse au mécanisme de cristallisation du sel est étroitement liée à sa résistance. C'est la résistance du matériau à la pression de cristallisation, qui crée une contrainte de traction à la surface des pores (Benavente et al., 2004).

Cependant, le tuf carbonaté présente des pores plus larges, où l'efficacité de la pression saline diminue considérablement. Dans ces pores, les cristaux peuvent percoler à travers des larges pores sans générer des pressions de cristallisation importantes sur les parois des pores (Benavente, 2011; Benavente et al., 2011). En outre, le calcaire rose renferme des micropores, où la croissance cristalline produit une pression de cristallisation efficace sur la paroi des pores. La pression générée par la croissance de la cristallisation du sel crée une connexion entre les pores isolés et les pores ouverts, ce qui élargit les fissures et crée des fractures (La Russa et al., 2013). De plus, quelques minéraux argileux sont également observés entre les cristaux de calcite et les fissures superficielles. Ainsi, les oxydes de fer et les minéraux argileux peuvent également améliorer l'efficacité de la cristallisation du sel et contribuer à la désagrégation granulaire et à la fissuration.

5. Conclusion

Les pierres saines des calcaires roses et des tufs carbonatés sont soumis à l'essai de vieillissement accéléré par la cristallisation saline, afin de reconstituer les mécanismes de dégradation au sel. Les propriétés de ces échantillons ont été évaluées morphologiquement ainsi que les mesures des masses, masse volumique et porosité ouvertes de ces échantillons. En effet, l'action des sels sur les calcaires roses n'est efficace qu'à partir de 6^{ème} cycle. Avant

cette limite, la concentration de solution saline n'est pas suffisante pour générer une dégradation du matériau. Au-delà de ce cycle, les variations apparaissent clairement qui sont montrée par les formes d'altération tels que l'écaillage, l'efflorescence et la fracturation. Ces formes d'altération se traduisent par une perte de masse et variations de dimensions qui influence les masses volumiques de chaque roche ainsi que leurs porosités, où la vitesse d'altération traduite par le taux de perte de masse n'est pas constante et augmente avec le nombre de cycle. Le calcaire rose se dégrade à partir des zones bioturbés et par l'extension des fissures. Les résultats obtenus montrent que la dégradation de la pierre calcaire rose par la cristallisation de sel se traduit par une perte de matière (désagrégation granulaire) et l'écaillage et aussi par la fissuration. Ces observations son bien visible au niveau de la muraille et de la basilique où ces formes d'altération son bien développé au côté de l'alvéolisation. Les tufs carbonatés ne sont pas vraiment affectés par la dégradation saline mais la faible résistance de leur structure induit l'action mécanique sur leur dégradation. Cette hypothèse est bien confirmée lors de l'utilisation de ce type de pierre à la base de la Muraille au niveau de la façade Est.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

La préservation des monuments historiques en tant que témoins des traces des civilisations anciennes constitue un enjeu et un défi majeur pour la science. La présente thèse se concentre sur l'objectif de contribuer à une meilleure compréhension et connaissance des mécanismes de l'altération et ainsi de déterminer les paramètres essentiels contrôlant majoritairement le phénomène de l'altération au niveau de la Muraille et de la Basilique de Tébessa. Ainsi, deux pierres carbonatées les plus représentées dans les monuments étudiés soit : les calcaires roses et les tufs carbonatés, dont les caractéristiques principales sont très différentes, ont été choisies comme exemple afin de démontrer la nécessité d'une étude approfondie visant à bien distinguer les mécanismes qui occurrent dans ces pierres et leurs modalités d'utilisation.

La question des carrières Romaines anciennes d'extraction des pierres constitue une des questions cruciales lors des travaux de restauration. En effet, au niveau de Tébessa, deux carrières d'extraction anciennes ont été découvertes (mis à jour), celle de Djebel Doukkane qui est la source des calcaires roses de Turonien moyen et celle de Djebel Djoua qui est la source des tufs carbonatés. Ces calcaires roses sont représentés par ces microfaciès : des wackestones à packstones et rarement grainstone dû à leur origine de dépôt dans des environnements lagunaires. La porosité de ce calcaire est de type vuggy et fissurale. En effet, la dissolution, la dolomitisation, la fracturation sont les processus qui sont responsable de la formation de ce type de porosité secondaire. Ces calcaire rose sont riches en bioturbations avec la présence des microfissures à remplissage d'oxydes de fer et des particules argileuses. Les surfaces bioturbés sont riches en oxydes de fer et en cristaux de dolomites à cœur ferrière où ces surfaces bioturbés sont plus poreuses par rapport aux surfaces non-bioturbé. Les tufs carbonatés présentent une porosité importante avec des textures arborescentes dues au moulage feuillages. La calcite et le minéral principal des deux pierres étudié où le quartz, goethite et dolomite sont des minéraux se trouvant à faible proportion dans les calcaires roses.

La faible porosité des calcaires roses est caractérisée par la microporosité (porosité intercrystalline) qui est indiqué par sa masse volumique et compacité. En outre, les tufs carbonatés montrent un volume important de macropores et une faible masse volumique. L'importance de la porosité ouverte accessible à l'eau se reflète dans le coefficient d'absorption capillaire, où la faible valeur de la porosité de calcaire correspond à un faible taux d'absorption capillaire, alors que le tuf carbonaté poreux reflète une valeur élevée de coefficient d'absorption capillaire. Cette structure poreuse à un impact sur les propriétés mécaniques des pierres, où l'existence d'une relation linéaire négative des vitesses de l'onde P et de la porosité. La relation entre la résistance à la compression et la porosité présente une

tendance exponentielle négative. Les calcaires et les tufs présentent une résistance moyenne à très faible allant de 56 à 70 MPa pour les calcaires et de 1,5 à 3 MPa pour les tufs carbonatés. En effet, La connaissance des propriétés physico-mécanique des pierres est primordiale pour des prédictions de leurs comportements dans l'environnement d'utilisation.

Les différentes observations réalisées, sur la muraille et la basilique avec les deux types de pierres ont permis de constater que les formes d'altération de ces pierres sont variées et sont contrôlées par leurs position et l'orientation des façades. En effet, pour les calcaires roses plusieurs formes d'altération sont montrés à leurs surfaces en allant de l'efflorescence, salissure à la base des façades à l'écaillage, alvéolisation, fracturation, décoloration, désagrégation granulaire et croute blanche au milieu et au sommet des façades. L'écaillage est une forme d'altération lié toujours à l'alvéolisation et qui constitue sa première phase de développement. La fracturation et la décoloration sont deux formes d'altérations qui touchent ces pierres à tous les niveaux et avec différentes intensités. Ces formes d'altération sont plus prononcées dans la façade Nord qui présente un état de dégradation avancée que sur les autres façades. En outre, les tufs carbonatés présentent différentes formes d'altérations telles que le poudrage, la désagrégation granulaire et la fracturation. Ces tufs carbonatés montrent une dégradation avancée quand ils sont disposés à la base de la muraille sous l'effet des charges appliquées; par contre ces pierres sont saines dans les parties supérieures de la Muraille Byzantine. Les dommages moyens et sévères sont les plus importants surtout dans la façade Nord. Les indices de dommages linéaires et indices de dommages progressifs montrent l'état alarmant de la dégradation au niveau de la façade Nord et cela est plus accentue dans la muraille Byzantine. Les bioturbations semblent être la faiblesse des calcaires roses à cause de leur minéralogie et porosité.

Les propriétés pétrophysiques des deux types de pierres dégradés sont différentes par rapport aux pierres supposés saines extraites des carrières. En effet, les calcaires dégradés présentent une diminution de la masse volumique et une augmentation de la porosité liée à la fracturation et la création de nouveau pores. Pour les tufs carbonatés, une diminution de la porosité est observée au côté de la diminution de sa masse volumique. L'utilisation de la porosimétrie au mercure à montrer que le calcaire montre une fermeture de ces pores et l'augmentation des micropores. Les ondes ultrasoniques mesurées montrent une diminution des ondes V_p pour les deux types de pierres. Les formes d'altération génèrent une perte de cohésion des grains ce qui est refléter par les valeurs de rebonds de marteau de Schmidt en comparant la résistance des surfaces saines et dégradé. L'analyse minéralogique pour les

différents produits de formes d'altération montre que le gypse et l'halite sont les minéraux responsables de l'altération et de la dégradation des pierres aux niveaux des monuments de Tébessa. Ces sels sont observés dans la porosité et les fissures aux cotés des argiles existantes et leur présence influe sur la circulation des fluides. Cette dégradation qui touche les pierres de ces monuments sont dû principalement à l'action saline de gypse et de l'halite. Ces sels sont actifs jusqu'à 3 m de sol, et cela est dû probablement à la remontée capillaire et à l'action des pluies. L'action d'humidification-séchage est un processus important dans la région vu le climat semi-aride où la façade Nord est la plus touchée.

Le test de cristallisation du sel a permis d'estimer les processus de vieillissement ainsi que l'évolution pétrophysique de la réponse de la pierre. Les tufs carbonatés présentent une excellente résistance à la cristallisation du sel par rapport aux calcaires. Une altération et une augmentation des fissures ont été constatées à la surface des pierres. La bioturbation influence la porosité et la teneur en oxyde de fer des pierres, induisant une désagrégation granulaire et des couleurs brunâtres après le contact avec de l'eau. Ces formes d'altération sont accentuées par l'action du sel et créent des fractures, des écaillages et une désagrégation plus granulaire. La résistance mécanique est importante pour expliquer la dégradation du tuf carbonate, qui présente une très faible résistance aux charges lorsqu'il est utilisé dans la partie inférieure du mur byzantin. Pour les tufs carbonatés, il y a perte de constituants de sel car la taille des pores est énorme et les cristaux de sel sont facilement évacués hors des calculs. La défaillance de ces pierres dans la construction est due à leur faible résistance à la compression. Ces pierres se sont facilement et rapidement cassées lorsqu'elles ont été utilisées au pied du mur byzantin et sont restées intactes lorsqu'elles ont été utilisées dans les rangées supérieures. Dans le mur byzantin, les dommages vont de modérés à graves, ce qui démontre la conservation inadéquate du mur byzantin et la nécessité de mesures de conservation urgentes.

Le remplacement de la pierre fortement dégradée est nécessaire pendant les premières étapes de la conservation. Cette étape réduira le risque de perte de stabilité structurelle du mur byzantin. D'autres méthodes de conservation des pierres doivent être utilisées pour réduire les dommages sur les pierres des monuments. Pour limiter l'influence du sel sur le mur, il est essentiel d'empêcher l'action de l'eau et la remontée d'humidité. Enfin, la dégradation future du patrimoine bâti de Tébessa devrait être plus importante pour le calcaire que pour le tuf calcaire.

Références bibliographiques

- Adamo P., Violante P. (2000) Weathering of rocks and neogenesis of minerals associated with lichen activity. *Appl Clay Sci*, 16:229–256
- Ahmad A. (2012). Characterization of natural and consolidated stones from Jordan with non-destructive ultrasonic technique and physico-mechanical methods. Doctoral dissertation Technische Universität Dortmund. 174 p.
- Akin M., Özsan A. (2011) Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. *Bull EngGeol Environ* 70:101-114. <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0287-x>
- Angeli M., Bigas J. P., Benavente D., Menéndez B., Hébert R., & David C. (2007). Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52(2), 205-213.
- ANRH (2002) Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie. Edit : Agence nationale des ressources hydrauliques. Alger, 42 p.
- Arnold A., Jeanette D., Zehnder K. (1979) Proposal for a terminology of weathering phenomena on building stones. International Council of Monuments and Sites (ICOMOS) Group Petrography, 80 p.
- Barcellona-Vero L., Montesila M. (1978) Mise en évidence de l'activité des thiobacilles dans les altérations des pierres à Rome. In: Symposium Deterioration and Protection of Stone Monuments, Paris, Publ. 13-13
- Baudelot S., & Géry B. (1979) Découverte d'Acritarches du Cambrien supérieur et du Trémadoc dans le massif ancien de Grande Kabylie (Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 288, 1513-1516
- Beck K. (2007) Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité (Doctoral dissertation, Université d'Orléans). 226 p.
- Beeger D. (1988) Zur Dokumentation der in Architektur und Plastikverwendeten Gesteinsarten und der auftretenden Verwitterungsformen. *Abh Staatl Museum Mineral Geol Dresden* 35:129–137
- Belfiore C.M., Fichera G.V., La Russa M.F., Pezzino A. and Ruffolo S.A. (2012) - The Baroque architecture of Scicli (south-eastern Sicily): Characterization of degradation materials and testing of protective products. *Periodico di Mineralogia*, 81, 19-33.
- Bell F. G. (1992). Salt mining and associated subsidence in mid-Cheshire, England, and its influence on planning. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 29(4), 371-386.
- Benavente D. (2011) Why pore size is important in the deterioration of porous stones used in the built heritage? *Macla* 15:41–42
- Benavente D., Cueto N., Martínez-Martínez J., García Del Cura M.A., Canãveras J.C. (2007a) The influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environ Geol* 52:197–206. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0475-y>
- Benavente D., del Cura M. G., Fort R., & Ordóñez S. (1999). Thermodynamic modelling of changes induced by salt pressure crystallization in porous media of stone. *Journal of Crystal growth*, 204(1-2), 168-178

- Benavente D., García-del-Cura M.A., Fort R., Ordóñez S. (2004) Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *EngGeol* 74:113–127
- Benavente D., Martínez-Martínez J., Cueto N., García-del-Cura M.A. (2007b) Salt weathering in dual-porosity building dolostones. *EngGeol* 94:215–226
- Benavente D., Martínez-Martínez J., Cueto N., Ordóñez S., García Del Cura M.A. (2018) Impact of salt and frost weathering on the physical and durability properties of travertines and carbonate tufas used as building material. *Environ Earth Sci* 77:147. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7339-0>
- Benavente D., Pla C., Cueto N., Galvañ S., Martínez-Martínez J., García-del-Cura M.A., Ordóñez S. (2015) Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure. *EngGeol* 195:301–311
- Benavente D., Sanchez-Moral S., Fernandez-Cortes A., JC C., Elez J., Saiz-Jimenez C. (2011) Salt damage and microclimate in the Postumius tomb, Roman necropolis of Carmona, Spain. *Environ Earth Sci* 63:1529–1543
- Benavente, D., del Cura, M. G., Bernabéu, A., & Ordóñez, S. (2001) Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology*, 59(3-4), 313-325.
- Bland W., Rolls D., (1998) *Weathering, An Introduction to the Scientific Principles*. Arnold, London. 281 p.
- Blas de Roblès J-M. et Sintès C. (2003) *Sites et monuments antiques de l'Algérie*, éditions Sécum. Edisud, Aix-En-Provence.
- Blés J. L. (1969). Contribution à l'étude des déformations cassantes de la feuille de Morsott (SE Constantinois–Algérie). Les microfracturations et leurs relations avec les failles et les plis. Publications du Service Géologique de l'Algérie, (Série N 11). Bulletin N, 39, 7-17
- Bouillin J. P. (1979) La transversale de Collo et d'El Milia (Petite Kabylie) : une région-clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. *Société géologique de France*. ns, 57(1978), 135 p.
- Bouillin J. P., & Raoult, J. F. (1971). Présence sur le socle kabyle du Constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs ; le Numidien peut-il être un néo-autochtone ? *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(3-4), 338-362
- Bourbié T., Coussy O., & Zinszner B. (1986) *Acoustique des milieux poreux* Editions Technip. 27 p.
- Brunet-Imbault B. (1999) *Etude des patines de pierres calcaires mises en œuvre en Région Centre. Caractérisation de l'évolution de la minéralogie et du milieu poreux. Effets comparés de différents nettoyages* (Doctoral dissertation). 243 p.
- Cagnat R. (1909) *Carthage, Timgad, Tébessa et les villes antiques de l'Afrique du Nord*. H. Laurens
- Camuffo D. (1992) Acid rain and deterioration of monuments: how old is the phenomenon? *Atmos Environ* 26B: 241–247
- Camuffo D., Del Monte, M., Sabbioni, C., & Vittori, O. (1982) Wetting, deterioration and visual features of stone surfaces in an urban area. *Atmospheric Environment*, 16(9), 2253-2259

- Cardell C., Delalieux F., Roumpopoulos K., Moropoulou A., Auger F., Van Grieken R., (2003) Salt induced decay in calcareous stone monuments and buildings in a marine environment in SW France. *Construction and Building Materials*, vol. 17, 165-179.
- Cassar J. (2002) Deterioration of the Globigerina limestone of the Maltese islands. *Geol Soc Lond Spec Pub* 205:33–49. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.205.01.04>
- Castel P. (1912) *Tébessa : Histoire et description d'un territoire algérien*. Henri Paulin, Paris, 153 p.
- Charola A. E. (2004). Stone deterioration in historic buildings and monuments. In *Proceedings of the 10th International congress on Deterioration and Conservation of Stone*; Vol. 1, 3 p.
- Charola AE (2000) Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *J Am Inst Conserv* 39:327–343
- Chen C., & Czerwinski, M. P. (2000). Empirical evaluation of information visualizations: an introduction. *International journal of human-computer studies*, 53(5), 631-635
- Choquette P. W., & Pray L. C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *AAPG bulletin*, 54(2), 207-250
- Clyde W. C., Gingerich P. D., Wing S. L., Röhl U., Westerhold T., Bowen G., ... & Schnurrenberger, D. (2013). Bighorn Basin Coring Project (BBCP): a continental perspective on early Paleogene hyperthermals. *Scientific Drilling*, 16, 21-31.
- Coquand H. (1862) *Description géologique de la province de Constantine*. Mémoires de la société géologique de France. Dagand, Bône. 499 p.
- Correns C. W. (1949). Growth and dissolution of crystals under linear pressure. *Discussions of the Faraday society, current research*. Getty Conservation Institute, Los Angeles 5, 267-271
- Correns C.W., Steinborn W. (1939) Über die Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft. *Z Kristallogr* 101:117–133
- Correns C.W., von Engelhardt W. (1938) Neue Untersuchungen über die Verwitterung des Kalifeldspates. *Chemie der Erde*, 12:1–22
- De La Calle C., Suquet H. (1988) Vermiculite. In: Bailey SW (ed) *Hydrous phyllosilicates*. *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, vol 19, 455–496
- De Quervain F. (1945) Verhalten der Bausteine gegen Witterungseinflüsse in der Schweiz. *Beitr Geol Schweiz, Geotech Ser*, Kümmerly & Frey, Bern, vol 23: 1–66
- De Ville fosse R. H. (1952) *Couronnes de Paris*. B. Grasset. 221p.
- Del-Cura M. Á. G., Pedley M., Delgado S. O., & Martín J. A. G. (2000) Petrology of a barrage tufa system (Pleistocene to recent) in the Ruidera Lakes Natural Park (Central Spain). In *V Congreso Geológico de España: Alicante, 10-14 julio, 2000: Congreso Geológico de España (5°. 2000. Alicante)*. Servicio de Publicaciones, 359 p.
- Del-Cura, M.A.G., Benavente D., Martínez J.M., Cueto N. (2012) Sedimentary structures and physical properties of travertine and carbonate tufa building stone. *Constr Build Mater* 28:456–467
- Delgado Rodrigues J., Charola A.E. (1996) General report on water repellents. *Sci Technol Cult Heritage* 5:93–103

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Derjaguin B.V., Obukov E.V. (1936) Anomaliendünnere Flüssigkeitsschichten. III Acta Physicochim. URSS 5(1) :1–22
- Dessandier D. (2000) Guide méthodologique de sélection des pierres des monuments en termes de durabilité et compatibilité. BRGM. 76 p.
- Dessandier D. (2003) Le temps de produits hydrofuges appliqués sur échantillons de calcaire et de marbre. 38 p.
- Dessandier D., Blanc A., Bromblet P., & Mertz J. D. (2002) Durabilité et compatibilité des pierres des monuments : proposition d'une méthodologie de sélection. *Pierre actual*, 791, 66-75.
- Dessandier, D., Blanc, A., Bromblet, P., & Mertz, J. D. (2002). Durabilité et compatibilité des pierres des monuments : proposition d'une méthodologie de sélection. *Pierre actual*, 791, 66-75.
- Dixon J.B., Weed S.B. (1989) Minerals in soil environments, 2nd edn. Soil Science Society of America, 1244 p.
- Dobereiner L., De Freitas M.H. (1986) Geotechnical properties of weak sandstones. *Géotechnique* vol. 36, no 1, 79-94
- Doehne E. (1994) In situ dynamics of sodium sulfate hydration and dehydration in stone pores: observations at high magnification using the environmental scanning electron microscope. In: Fassina V, Ott H, Zezza F (eds) *The conservation of monuments in the Mediterranean Basin*. Venice, 143–150
- Doehne E. (2002) Salt weathering: a selective review. In: Siegesmund S, Weiss T, Vollbrecht A (eds) *Natural stones, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*. Geol Soc Spec Publ 205:43–56
- Doehne, E., & Price, C. A. (2010). *Stone conservation. An Overview of Current Research*. Second Edition. Getty Conservation Institute. Los Angeles, 158 p.
- Dornieden T, Gorbushina A (2000) New methods to study the detrimental effects of poikilotropic microcolonial micromycetes (PPM) on building materials. In: Fassina V (ed.) *Proceedings of the 9th Intern. Conf. on Deterioration and Conservation of Stone*, Elsevier, Amsterdam. Vol.1, 461-468
- Dunham, R.J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. - In: Ham, W.E. (ed.): *Classification of carbonate rocks. A symposium*. Amer. Ass. Petrol. Geol. Mem., 1, 108-171
- Durand Delga M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie, NS. Bull. soc. Géol.*, (7), xiii, 328-337
- Durozoy M.G. (1953) feuille n° 206, carte géologique et notice explicative, à 1/50000e. Alger Serv Carte Géol, Algérie
- Duttlinger W., Knöfel D. (1993) Salzkristallisation und Salzschaadensmechanismen. *JahresberichtSteinzerfall—Steinkonservierung 1991*, Ernst & Sohn Verlag, 197–213
- Eickelberg U., Herppich S., Zallmanzig J. (1990) Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme—Untersuchung, Bewertung und RestaurierungdenkmalpflegerischerObjekte. *Bautenschutz und Bausanierung, Special Issue*, 42 p.
- EN-12370 (1999) Natural stone test methods-Determination of resistance to salt crystallisation. 3 p.

- Eppes M.C. et Griffing D. (2010) Granular disintegration of marble in nature: a thermal-mechanical origin for a gorges and corestone landscape. *Geomorphology* 117:170–180
- Eppes M.C., Keanini R. (2017) Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking. *Rev Geophys* 55(2), 470-508. <https://doi.org/10.1002/2017RG000557>
- Esbert R.M., Diaz-Pache F., Grossi C.M., Alonso F.J., & Ordaz J. (2001). Airborne particulate matter around the Cathedral of Burgos (Castilla y León, Spain). *Atmospheric Environment*, 35(2), 441-452
- Ezzdine R. (2009) Endommagement des monuments historiques en maçonnerie. Thèse de doctorat. Bordeaux I. 227 p.
- Faugere J.G., Derion J., & Lafond-Grellety J. (1993). Methodologie d'enquete sur la qualite de l'habitat et l'etat de sante des populations en milieu urbain ancien. In PAPERS FROM THE WORLD CLEAN AIR CONGRESS. AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION. (Vol. 7, 12 p.
- Fitzner B. (2002) Damage diagnosis on stone monuments-in situ investigation and laboratory studies. In Proceedings of the International Symposium of the Conservation of the Bangudae Petroglyph. 7 (29-71)
- Fitzner B., Heinrichs K. & LaBouchardiere D. (2002): Damage index for stone monuments. In: Galan E. & Zezza F. (ed.): Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities, Proceedings of the 5th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla, Spain, 5-8 April 2000: 315-326,
- Fitzner B., Heinrichs K. (2001) Damage diagnosis at stone monuments—weathering forms, damage categories and damage indices. In: Prikryl R, Viles H (eds) Understanding and Managing Stone Decay. The Karolinum Press, Prague, 11–56
- Fitzner, B., & Heinrichs, K. (1998) Evaluation of weathering damages on monuments carved from rocks in Petra/Jordan: research project 1996-1999. *Annals of the Department of Antiquities of Jordan*, 42, 341-360.
- Fitzner B., Heinrichs K., Kownatzki R. (1995) Weathering forms—classification and mapping. In: Sneath R (ed) Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I. Ernst, Berlin, 41–88
- Fitzner B., Heinrichs K., La Bouchardiere D. (2004) The Bangudae Petroglyph in Ulsan, Korea: studies on weathering damage and risk prognosis. *Environ Geol* 46: 504–526
- Fitzner B., Sneath R. (1983) Modellvorstellungen zum Kristallisations- und Hydratationsdruck von Salzen im Porenraum von Sandsteinen. Sitzungsbericht des Arbeitskreises 'Naturwissenschaftliche Forschung an Kunstgütern aus Stein', Erlangen. 49 p.
- Flatt, R. J. (2002) Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of crystal growth*, 242(3-4), 435-454
- Fleury J. J. (1974) Contribution à la connaissance des rhabdionininae (foraminifères, alveolinidae) crétacés. *Geobios*, 7(4), 307-322
- Franzini M., Gratzu C., Spampinato M. (1984) Degradazione del marmot per effectto di variazioni di temperatura. *Rendiconti Societa` Italiana di Mineralogia e Petrologia*. 39(1):47–58.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Frediani P., Malesani P.G., Vanucci S. (1976) Weathering of Florentine stones: sulfatation and its determination. In: 2nd Intern. Symposium on Deterioration of Building Stones, 117–118
- Fuchs G. (2006) Allgemeine Mikrobiologie. Georg Thieme, Stuttgart, 321-340
- Furlan V., Girardet E. (1983) Considerations on the rate of accumulation and distribution of sulphurous pollutants in exposed stones. In: Wittmann EH (ed.) Materials Science and Restoration. Lack und Chemie, Filderstadt, 285-290
- Goldich S.S. (1938) A study of rock weathering. *J. Geol.* 46, 17–58.
- Gomez-Heras M., McCabe S., Smith B.J., Fort R. (2009) Impacts of fire on stone-built heritage an overview. *J Architect Conserv* 15:47–58
- Gonzalez I.J., & Scherer G.W. (2004) Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. *Environmental Geology*, 46(3-4), 364-377
- Goudie A.S., Viles H.A. (1997) Salt weathering hazards. Wiley, Chichester. 443–446
- Grau B. J. (2013) Stone deterioration and replacement of natural building stones at the Cologne cathedral-A contribution to the preservation of cultural heritage. Dissertation, uni-goettingen, 218 p.
- Griffith A.A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos Trans R Soc London*; 221:163–98
- Grimmer A.E. (1984) A Glossary of Historic Masonry Deterioration Problems and Preservation Treatments. National Park Service Preservation Assistance Division, Washington, DC. 63-65
- Gründer J. (1980) ÜberVolumenänderungsvorgänge in überkonsolidierten, diagenetischverfestigten Tonen und ihreBedeutungfür die Baupraxis. *Geotechnik (Essen)* 2:60–66
- Guillitte O.& Dreesen R. (1995). Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. *Science of the total environment*, 167(1-3), 365-374.
- Hammecker C. (1993). Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre. Doctoral dissertation, Strasbourg 1, 254 p.
- Hammecker C. (1995). The importance of the petrophysical properties and external factors in the stone decay on monuments. *pure and applied geophysics*, 145(2), 337-361
- Heim D. (1990) Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. Enke Verlag, Stuttgart, 157 p.
- Heinrichs K. (2008) Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. *Environ Geol* 56(3):643–675
- Hirschwald J. (1908) Die Prüfung der natürlichenBausteine auf ihreVerwitterungsbeständigkeit. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- Hoffmann A., Siegesmund S. (2007) Investigation of dimension stones in Thailand: an approach to a methodology for the assessment of stone deposits. *Z dtshGesGeowiss* 158/3:375–416.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hutchinson G.L., Guenzi W. D., & Livingston G.P. (1993). Soil water controls on aerobic soil emission of gaseous nitrogen oxides. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(1), 1-9
- ICOMOS-ISCS (2008) Illustrated glossary on stone deterioration patterns. English-French version. ICOMOS Documentation Centre, Paris, 78 p.
- Janvier S. (2012). Le carnet de santé d'un monument : Application au château de Chambord (Doctoral dissertation, Université d'Orléans). 304 p.
- Gonzalez, I. J., & Scherer, G. W. (2004) Effect of swelling inhibitors on the swelling and stress relaxation of clay bearing stones. *Environmental Geology*, 46(3-4), 364-377
- Johansson L-G., Lindqvist O., Mangio R.E. (1988) Corrosion of calcareous stones in humid air containing SO₂ and NO₂. In: Rosvall J, Aleby S (eds.) *Air Pollution and Conservation. Safeguarding our Architectural Heritage*. Elsevier, Amsterdam, 255–265
- Jones D., Wilson M.J. (1985) Chemical activity of lichens on mineral surfaces: a review. *Int. Biodeterioration*, 5:99–104
- Jones M.S., Wakefield R.D., Forsyth G. (2000) A study of biological decayed sandstone with respect to Ca and its distribution. In: Fassina V (ed.) *Proceedings of the 9th Intern. Conf. on Deterioration and Conservation of Stone*. Elsevier, Amsterdam, Vol. 1. 473–481
- Kessler D.W. (1919) Physical and chemical tests on the commercial marbles of the US. *Technology papers of the Bureau of standards*, 123 p.
- Kieslinger A. (1932) *Zerstörung an Steinbauten*. Deuticke, Leipzig, Wien. 346 p.
- Klopfner H. (1974) *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Bauverl. Wiesbaden, 235 p.
- Koch A., Siegesmund S. (2004) The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environ Geol* 46: 350 – 363
- Koestler R.J., Warscheid T., & Nieto F. (1997) Biodeterioration: risk factors and their management. *ENVIRONMENTAL SCIENCES RESEARCH REPORTS*, 20, 25-36.
- Kowalski W.M., Boudoukha A., Hemila M.L., Pharissat A. (1997) Les stades d'effondrement du graben de Tebessa (confins Algéro-tunisiens) et la tectonique Plicative PlioQuaternaire. *Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard*, 201-215.
- Kowalski W.M., Boufaa K., Pharissat A. (1996) Les sédiments miocènes des environs de Tébessa (NE de l'Algérie) et leurs relations avec la tectonique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard*, 169-177.
- Kowalski W.M., Hamimed M., Pharissat A. (1997) Les phases miocènes et pliocènes du diapirisme polyphasé entre l'Ouenza et Tébessa (NE de l'Atlas Saharien, Algérie). *Bull. Soc. Hist. Nat. Pays de Montbéliard*, 217-224.
- Kowalski W.M., Pharissat A., Hamimed M. (1995a) Analyses sédimentologiques de sables du Miocène des environs de Tébessa (Confins Algéro-Tunisiens). *Ann. Sci. Univ. Fr. – Comté, Géologie* 4, fasc.12, 1992-1993-1994-1995. Besançon 49-54.
- Kramar S., Mladenović A., Urosevic M., Mauko A., Pristacz H., Mirtič B. (2010) Deterioration of LesnoBrdo limestone on monuments (Ljubljana, Slovenia). *RMZ-Mater Geoenviron*:53–73

- Kraus K. (1988) Verwitterung von Naturwerksteinen. Stand des Wissens und offene Fragen. In: *Bautenschutz und Bausanierung* 11, 5:143–149
- Krumbein W.E. (1988) Biotransfer in monuments - a sociobiological study. *Durab. Build. Mater.*, 5:359–382
- Künzel H. M., & Krus M. (1995). Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassadendurch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. *Restoration of Buildings and Monuments*, 1(1), 5-20
- La Russa M.F., Barone G., Mazzoleni P., Pezzino A., Crupi V., & Majolino D. (2008) Characterisation and differentiation of pigments employed on the façade of “Noto’s Valley” monuments (Sicily). *Applied Physics A*, 92(1), 185-190.
- La Russa M.F., Ruffolo S.A., Belfiore C.M., Aloise P., Randazzo L., Rovella N., Pezzino A., Montana G. (2013) Study of the effects of salt crystallization on degradation of limestone rocks. *Period Mineral* 82:113–127. <https://doi.org/10.2451/2013PM007>
- Ladlani I (2007). Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l’estimation de l’évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba», Mémoire de magistère, Université de Batna, 174 p.
- Laird D.A. (2006) Influence of layer charge on swelling of smectites. *Appl Clay Sci* 34:74–87
- Lasaga A.C. (1984) “Chemical kinetics of water-rock interactions”, *J. Geophys. Res.*, vol. 89, B6, 4009-4025,
- Lipfert F.W. (1989) Atmospheric damage to calcareous stones: comparison and reconciliation of
- Livingstone R.A. (1988) The application of petrology to the prediction of stone durability. *Proc. 6th. Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone*, Torun, 432-445.
- Loughnan F.C. (1969) *Chemical weathering of the silicate minerals*. Elsevier, New York, 154 p.
- Lucia F.J. (1995) Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *AAPG bulletin*, 79(9), 1275-1300.
- Lucia F.J. (2007) *Carbonate reservoir characterization: An integrated approach*. Springer Science & Business Media. 337 p.
- Madsen F.T., Müller-Vonmoos M. (1989) The swelling behaviour of clays. *Appl Clay Sci* 4:143–156
- Malaga-Starzec K., Lindqvist J. E., & Schouenborg B. (2002). Experimental study on the variation in porosity of marble as a function of temperature. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 81-88.
- Martínez-Martínez J. (2008) Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de calizas, dolomías y mármoles. Evaluación mediante estimadores no destructivos (ultrasonidos). *Dissertation*, University of Alicante, Spain, 278 p.
- Martínez-Martínez J., Benavente D., García-del-Cura M.A. (2011) Spatial attenuation: the most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks. *Eng Geol* 119:84–95
- Mavko G., Mukerji T., & Dvorkin J. (1998) *The rock physics handbook*, 329 p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Moore C. H. (1989) Carbonate diagenesis and porosity. Elsevier Vol. 46, 338 p.
- Moore D.M., Reynolds R.C. (1997) X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, Oxford, 332 p.
- Neugebauer J. (1973) The diagenetic problem of chalk: the role of pressure solution and pore fluid. *JahrbGeolPalaeontolAbhandlungen*, 143, 223-45
- Nicholson D.T. (2001) Pore properties as indicators of breakdown mechanisms in experimentally weathered limestones. *Earth Surf Proc Land* 26:819–838. <https://doi.org/10.1002/esp.228>
- Okrusch M., Matthes S. (2009) Mineralogie. 8th rev. ed. Springer, Berlin Hiedelberg, 658 p.
- Ollier, C., Ash, A., & Ash, J. E. (1983) Fire and rock breakdown, *Z Geomorph N F* 27:363–374
- Peng S., & Zhang J. (2007) Engineering geology for underground rocks. Springer Science & Business Media, 320 p.
- Pinna D., Salvadori O. (2000) Endolithic lichens and conservation: an underestimated question. In: Fassina V (ed.) *Proceedings of the 9th Intern. Conf. on Deterioration and Conservation of Stone*. Elsevier, Amsterdam, Vol. 1, 513–519
- Press F., Siever R. (2003) *Allgemeine Geologie. Einführung in das System Erde*. 3. Ed. Elsevier, München, 723 p.
- Price D. G. (1995) Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28(3), 243-252.
- Prick A. (1995) Dilatometrical behaviour of porous calcareous rock samples subjected to freeze-thaw cycles. *Catena*, 25(1-4), 7-20
- Raccomandazione Normal 1/88 (1990) *Alterazioni Macroscopiche dei Materiali Lapidari: Lessico* (Macroscopic alterations of stone materials: glossary). CNR-ICR, Comas Graphica, Rome, 36 p.
- Raoult J.F. (1974). *Géologie du centre de la chaîne Numidique (Nord constantinois)*. Soc. Géol. France, Mémoire, 124 p.
- Rautureau M., (2001) *Tendre comme la pierre*, ouvrage collectif sous la direction de Michel Rautureau. Ed. Conseil régional, Centre et Université d'Orléans recent experimental findings. *Atmos Environ* 23:415–429.
- Robinson D.A., Williams R.B.G. (1994) Sandstone weathering and landforms in Britain and Europe. In: Robinson DA, Williams RBG (eds) *Rock Weathering and Landform Evolution*. John Wiley & Sons, Chichester, 371–391
- Rodriguez-Navarro C., & Doehne E. (1999). Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(3), 191-209
- Rodriguez-Navarro C., Hansen E., Sebastián E., Ginell W. (1997) The role of clays in the decay of ancient Egyptian limestone sculptures. *J Am Inst Cons* 36:151–163. <https://doi.org/10.2307/3179829>

- Rodriguez-Navarro C., Sebastian E. (1996) Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *Sci. Total Environ.*, 187:79–91
- Rousset-Tournier B., 2001. Transferts par capillarité et évaporation dans des roches – rôle des structures de porosité. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 196 p.
- Ruedrich J., Kirchner D., Siegesmund S. (2011) Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: a laboratory long-term study. *Environ Earth Sci.* 63:1573-1586
- Ruedrich J., Siegesmund S. (2006) Salt and ice crystallization in porous sandstones. *Environ Geol* 52(2):343-367
- Santos F., Peña A., Nogales B., Soria-Soria E., del Cura M. Á. G., González-Martín J. A., & Antón J. (2010) Bacterial diversity in dry modern freshwater stromatolites from Ruidera Pools Natural Park, Spain. *Systematic and Applied Microbiology*, 33(4), 209-221.
- Schäfer B. (1980) Luftverschmutzung durch Schwefel dioxid. Umweltbundesamt. 123 p.
- Scherer GW (1999) Crystallization in pores. *Cement Concr Res* 29:1347–1358
- Schlabach S. (2000) Auflösungsexperimente von Kaolinit, Montmorillonit, Illit, Serizit und Talk in Batch- und Durchfluss-Reaktoren. University of Göttingen, Doctoral dissertation, Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen, 85 p.
- Schuh H. (1987) Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. *Münchener Geowiss. Abh.*, 6: S.; Enke Verlag, Stuttgart, 66 p.
- Sebastián E., Cultrone G., Benavente D., Fernandez L.L., Eleert K., Rodriguez-Navarro C. (2008) Swelling damage in clay-rich sandstones used in the church of San Mateo in Tarifa (Spain). *J Cult Her* 9:66–76
- Sibley D. F. & Gregg J. M. (1987). Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Research*, 57(6), 967-975
- Siedel H., Siegfried S., Sterflinger K. (2011) Characterization of Stone Deterioration on Buildings. In: Siegesmund and Snethlage (ed.): *Stone in Architecture*. 4th ed., Springer, Berlin Heidelberg. 347-410
- Siedel H., Siegfried S., Sterflinger K. (2011) Characterization of stone deterioration on buildings. In: Siegesmund and Snethlage (ed) *stone in architecture*, 4th edn. Springer, Berlin, 347–410. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2_6
- Siegesmund S., Dürrast H. (2011) Physical and Mechanical Properties of Rocks. In: Siegesmund and Snethlage (ed.): *Stone in Architecture*. 4th ed., Springer, Berlin Heidelberg. 97-225
- Siegesmund S., Ruedrich J., Koch A. (2008a) Marble bowing: comparative studies of three different public building facades. *Environ Geol.* 56:473–494. doi:10.1007/s00254-008-1307-z
- Siegesmund S., Ruedrich J., Koch A. (2008b) Marble Bowing: Comparative studies of different public building facades. *Environ Geol* 56:473–494.
- Siegesmund S., Snehtlage R., Vollbrecht A., Weiss T. (1999) Themenheft Marmorkonservierung. *Z dt geol Ges* 150(2):406

- Siegesmund S., Ullemeyer K., Weiss T., Tschegg E. (2000) Physical weathering of marbles caused by thermal anisotropic expansion. *Int J Earth Sci* Vol 89:170–182
- Snethlage R. (1984) Steinkonservierung 1979 – 1983. Report Volkswagenstiftung. Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, Munic. 22: 203
- Snethlage, R., Fitzner, B., Ettl, H., Sattler, L., & für Denkmalpflege, B. L. (1995) Natursteinkonservierung in der Denkmalpflege, 22-40
- Snethlage R., Wendler E. (1997) Moisture cycles and sandstone degradation. In: Baer NS, Snethlage R (eds.) *Saving our Architectural Heritage: Conservation of historic stone structures*. John Wiley and Sons Ltd, London, 7–24
- Soltani, S.A.A. (1994). Un projet d'eau et d'architecture en Mésopotamie : restauration d'un pont-barrage romain à Shushtar, Doctoral dissertation, Verlag nichtermittelbar, 320 p.
- Spittgerber H. (1976) Spaltdruck zwischen Festkörpern und Auswirkungen auf Probleme in der Technik. *Cement Concrete Res* 6:29–34
- Steiger M (2005) Crystal growth in porous materials: I. The crystallization pressure of large crystals. *J Cryst Growth* 282:455–469
- Steiger M., Charola A. E., & Sterflinger K. (2011) Weathering and deterioration. In *Stone in architecture*, Springer, Berlin, Heidelberg. 227-316
- Stockhausen N. (1981) Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. Dissertation, Technical University of München, 163p.
- Scherer 1999 Scherer GW (1999) Crystallization in pores. *Cement Concr Res* 29:1347–1358
- Swets R. and Flatt J. (2002) Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of crystal growth*, 242(3-4), 435-454.
- Thomachot C. (2002) Modifications de propriétés pétrophysiques de grès soumis au gel ou recouverts d'encroûtements noirs vernissés, Doctoral dissertation, Strasbourg 1. 263 p.
- Thomachot C., & Jeannette D. (2002) Evolution of the petrophysical properties of two types of Alsatian sandstone subjected to simulated freeze-thaw conditions. *Geological Society, London, Special Publications*, 205(1), 19-32.
- Tiano M.J., Walker E.A., & Dykstra L. A. (1998) Cross-tolerance to etorphine differentiates μ -opioid agonists in a rat tail withdrawal assay. *Analgesia*, 3(4), 251-257.
- Tidblad J., Kucera V., Mikhailov A.A., Henriksen J., Kreislova K., Yates T. & Schreiner, M. (2001) UN ECE ICP materials: Dose-response functions on dry and wet acid deposition effects after 8 years of exposure. In *Acid rain 2000*, Springer, Dordrecht. 1457-1462
- Truillot A. (1902) *Autour de la basilique de Tébessa*. Braham, 434 p.
- Tsui N., Flatt R.J., Scherer G.W. (2003) Crystallization damage by sodium sulfate. *J Cult Heritage* 4:109–115
- Turkington A.V., Paradise T.R. (2005) Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology* 67:229–253

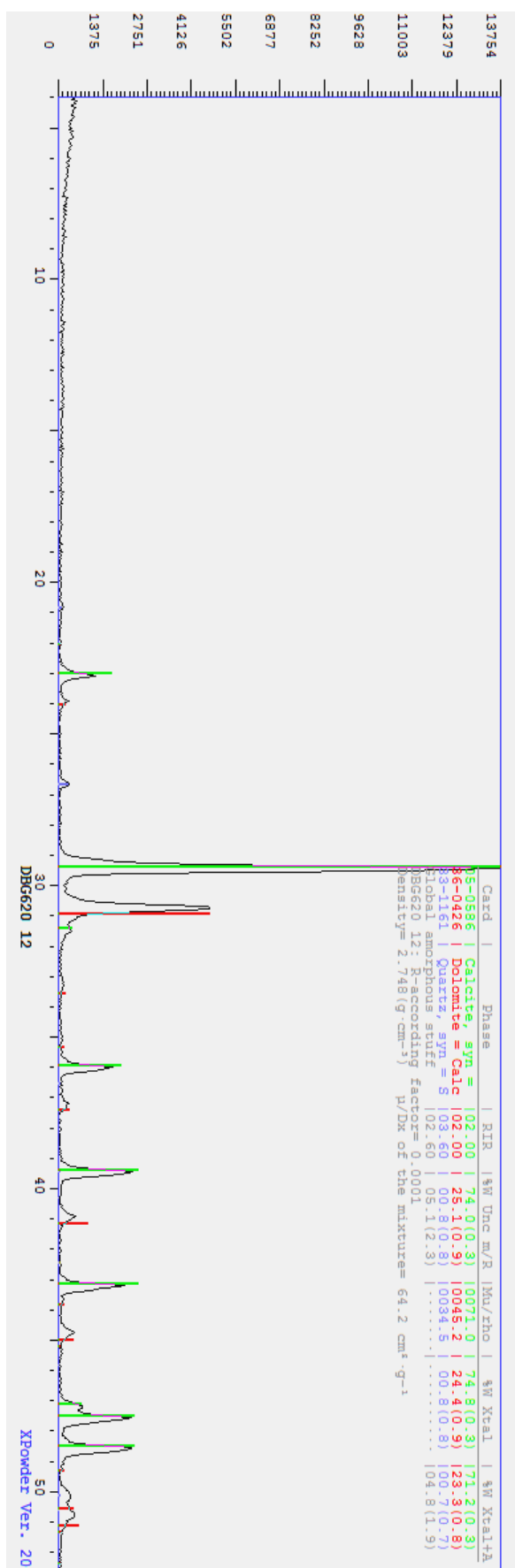
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

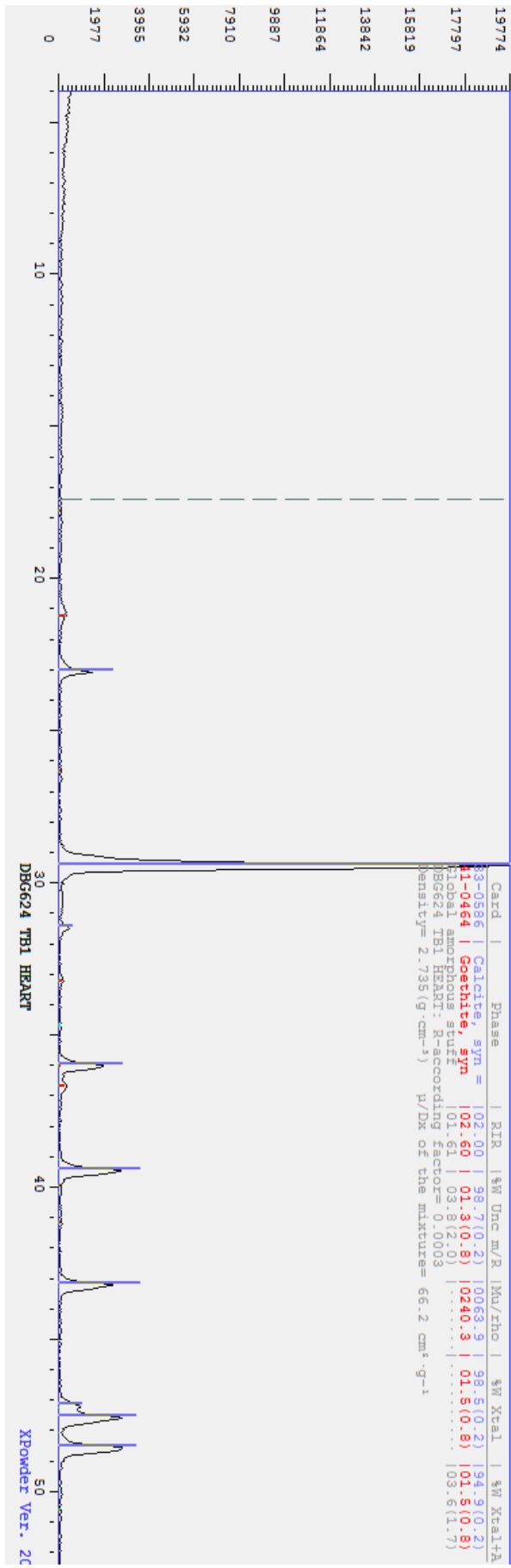
- UNE-EN 12523 (1999) Natural stone test methods. Determination of water absorption coefficient by capillarity, 8 p.
- UNE-EN 14579 (2005) Natural stone test methods. Determination of sound speed propagation. Madrid: Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR), 6 p.
- UNE-EN 12526 (2007) Natural stone test methods. Determination of uniaxial compressive strength. Madrid: Spanish Association for Standardisation and Certification (AENOR)
- UNE-EN 12527 (2007) Natural stone test methods. Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity. AENOR, Madrid, 13 p.
- Vergès-Belmin V. (2001) Altération des pierres mises en œuvre. Géomécanique environnementale, risques naturels et patrimoine. Paris: HERMES Science 307-329
- Vergès-Belmin V. (2010) de l'article/du chapitre Illustrated Glossary on stone deterioration patterns/Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. p. 70
- Vila J. M. (1974) Le Rocher de Constantine : Stratigraphie, microfaunes et position structurale. Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 65, 385-392
- Vila J.M. (1980) La chaîne alpine d'Algérie nord - orientale et des confins Algéro- Tunisiens : Thèse Doctorat d'Etat. Univ. P & M. Curie, Paris VI, 665 p.
- Viles H.A. (1996) Monitoring the effects of the Oxford Transport Strategy on building stone decay and soiling. In 8th= eighth international congress on deterioration and conservation of stone, Berlin, 30 Sept.-4 Oct. 1996: proceedings. 831-834
- Warscheid T., Petersen K., Krumbein W.E. (1990) A rapid method to demonstrate and evaluate microbial activity on decaying sandstone. Studies in Conservation, 35:137-147
- Weimann M.B. (2001) Hygrische Eigenschaften von Polymerbeton im Vergleich zu porösen mineralischen Werkstoffen im Bauwesen. Diss. Technische Hochschule Zürich, 149 p.
- Weiss T., Siegesmund S., Kirchner D., Sippel J. (2004) Insolation weathering and hygric dilatation: two competitive factors in stone degradation Environ Geol 46:402-413
- Wendler E., Charola A.E., & Fitzner B. (1996) Easter Island tuff: Laboratory studies for its consolidation. In Proceedings of the 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. 30:1159-1170
- White A.F. (2003) Natural Weathering Rates of Silicate Minerals. In: Treatise on Geochemistry, vol. 5. Drever JI et al. (eds) Elsevier, 133-168
- Wierzbos J., & Ascaso C. (1998) Mineralogical transformation of bioweathered granitic biotite, studied by HRTEM: evidence for a new pathway in lichen activity, 46(4), 446-452
- Wihr R. (1986) Restaurierung von Steindenkmälern. Callwey, München, 236 p.
- Wildi W. (1983) La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Revue de géographie physique et de géologie dynamique, 24(3), 201-297
- Winkler E.M. (1975) Stone: Properties, durability in man's environment. Springer, New York 18(3), 230-230

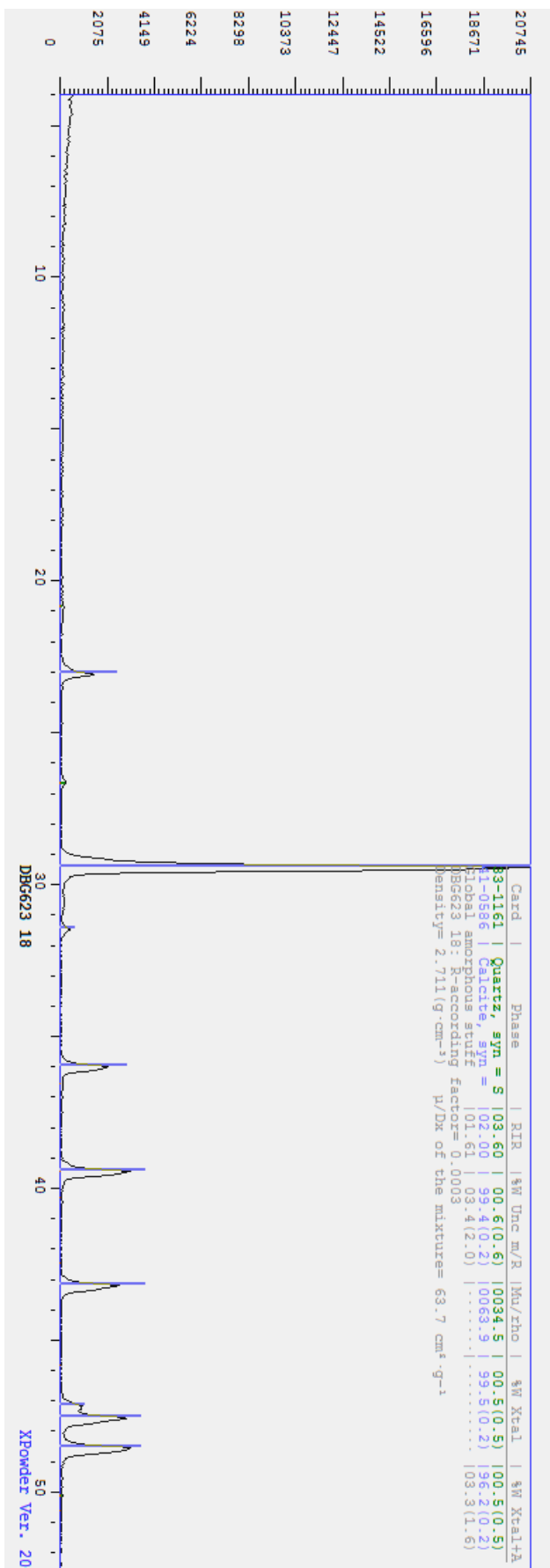
- Winkler E.M. (1994) *Stone in architecture*, 3rd ed. Springer Berlin Heidelberg New York, 314 p.
- Wittenburg C., Steiger M., Dannecker W., Rabelo de Carvalho C., & Pataca L. (1994) *Chemical Analysis of Stone Material*, IDEAS Project, Investigations into Devices against Environmental Attack on Stones. Publication of the GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 191-202
- Wollast R. (1990) Rate and mechanism of dissolution of carbonates in the system $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3$. In: *Aquatic chemical kinetics. Reaction rates of processes in natural waters*. Stumm W (ed.) John Wiley, New York, 432–445
- Xie P., Beaudoin J. J., & Brousseau R. (1992) AC impedance spectroscopy (I): a new equivalent circuit model for hydrated portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, 22(5), 833-840.
- Zappia G., Sabbioni C., Gobbi G. (1998) Effects of carbonaceous particles and heavy metals on mortar-SO₂ reactions. *RILEM, Materials and Structure*, 31:480–486
- Zehnder K., & Arnold A. (1989) Crystal growth in salt efflorescence. *Journal of crystal growth*, 97(2), 513-521
- Zinszner B., & Pellerin F. M. (2007) *A geoscientist's guide to petrophysics*. Editions Technip, 395 p.
- Zidi M., Tourir J., Boulvain F., El Albani A. (2019) Carbonate Deposit Microfacies and Carbonatogenesis of Abiod Formation (Campanian/Maastrichtian) in Jebel Kebar (Central Tunisia). In: Boughdiri M., Bádenas B., Selden P., Jaillard E., Bengtson P., Granier B. (eds) *Paleobiodiversity and Tectono-Sedimentary Records in the Mediterranean Tethys and Related Eastern Areas*. 225-227

Annexe

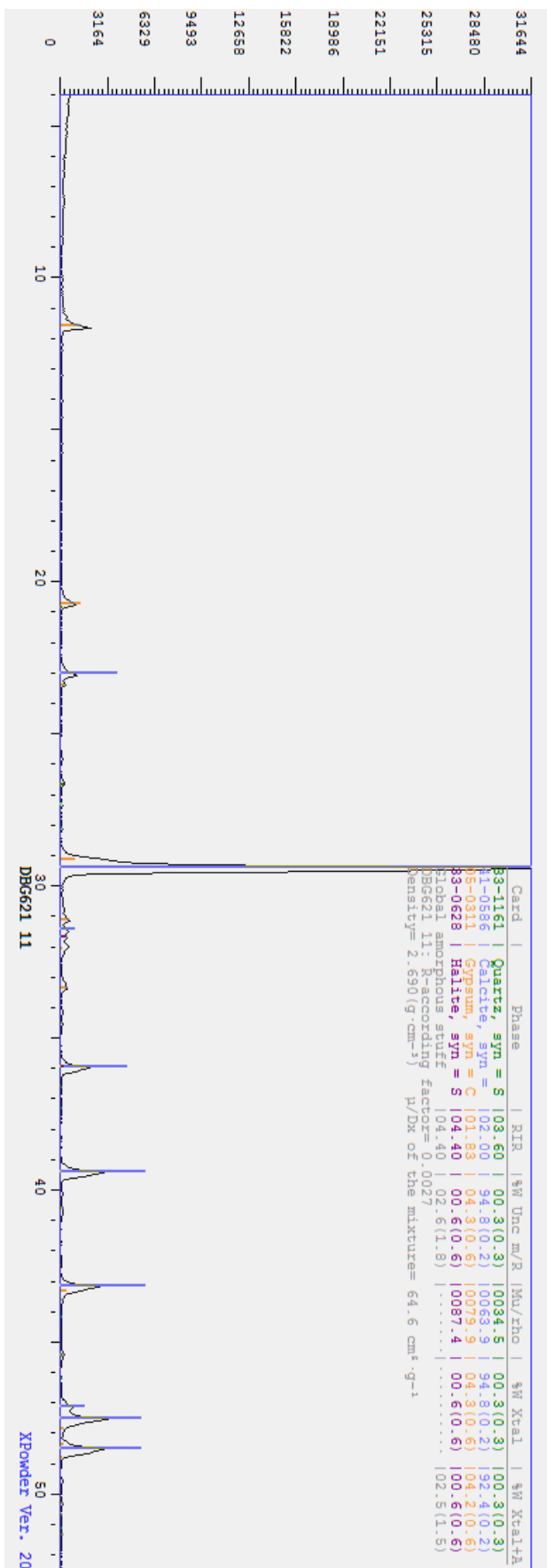
Minéralogie des calcaires roses sain :

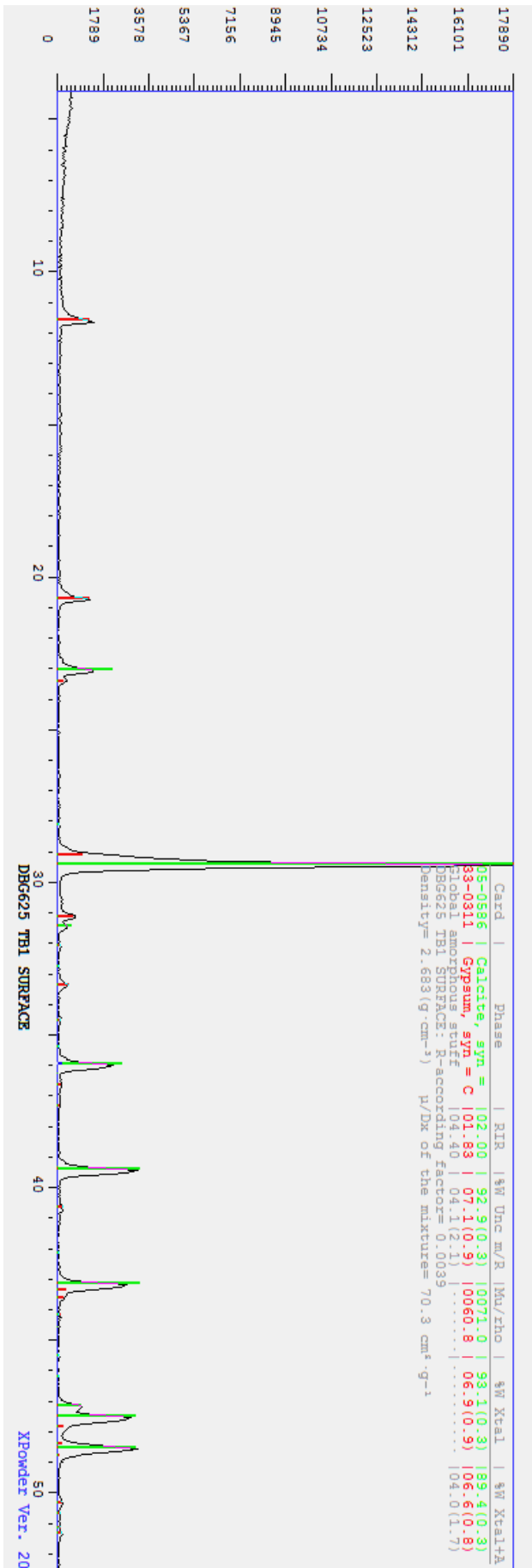


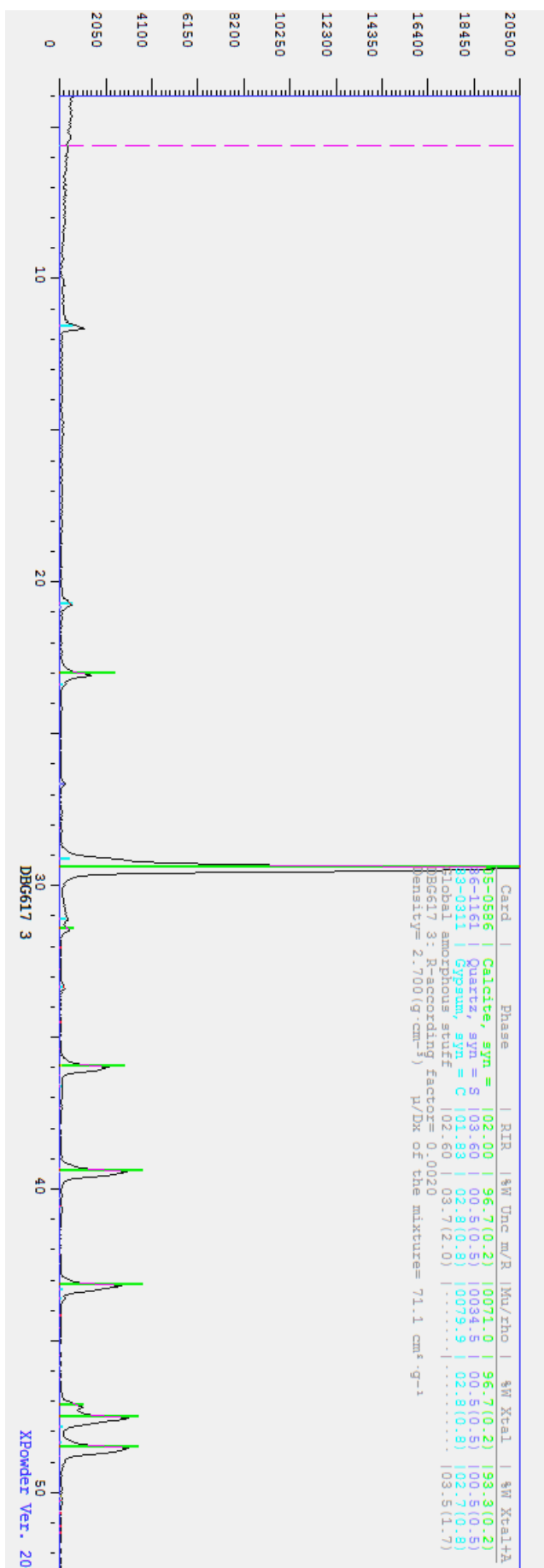


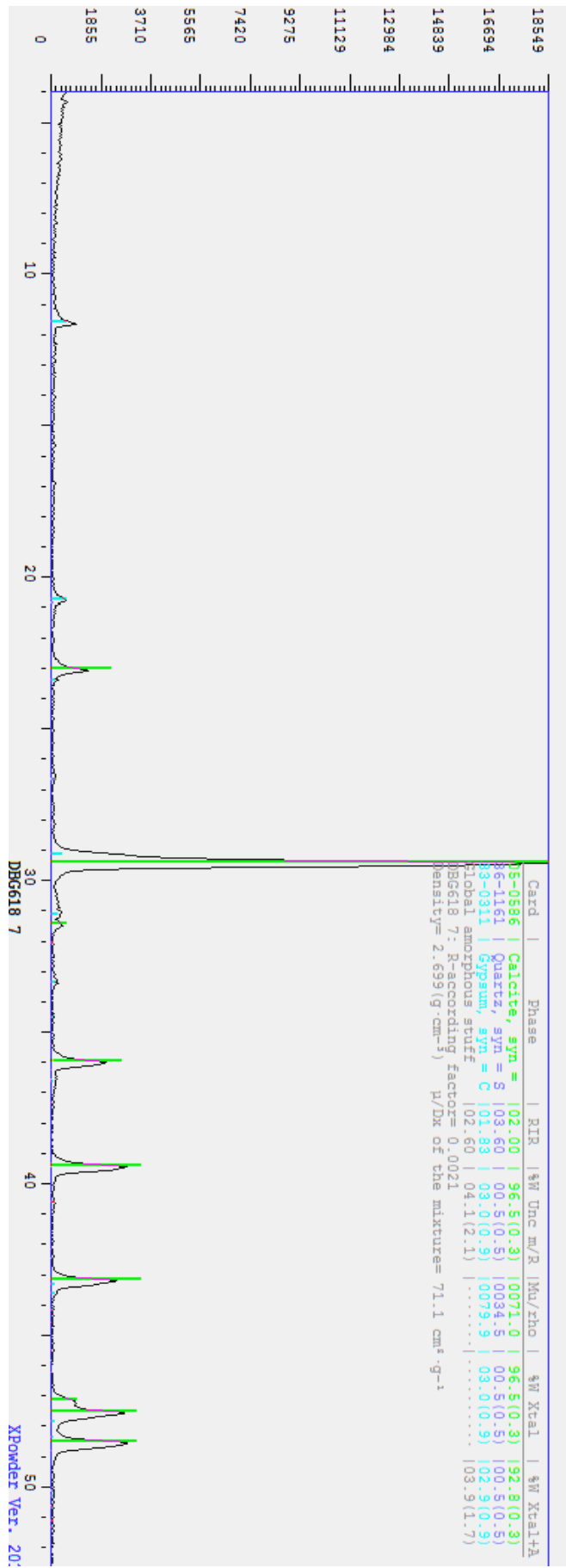


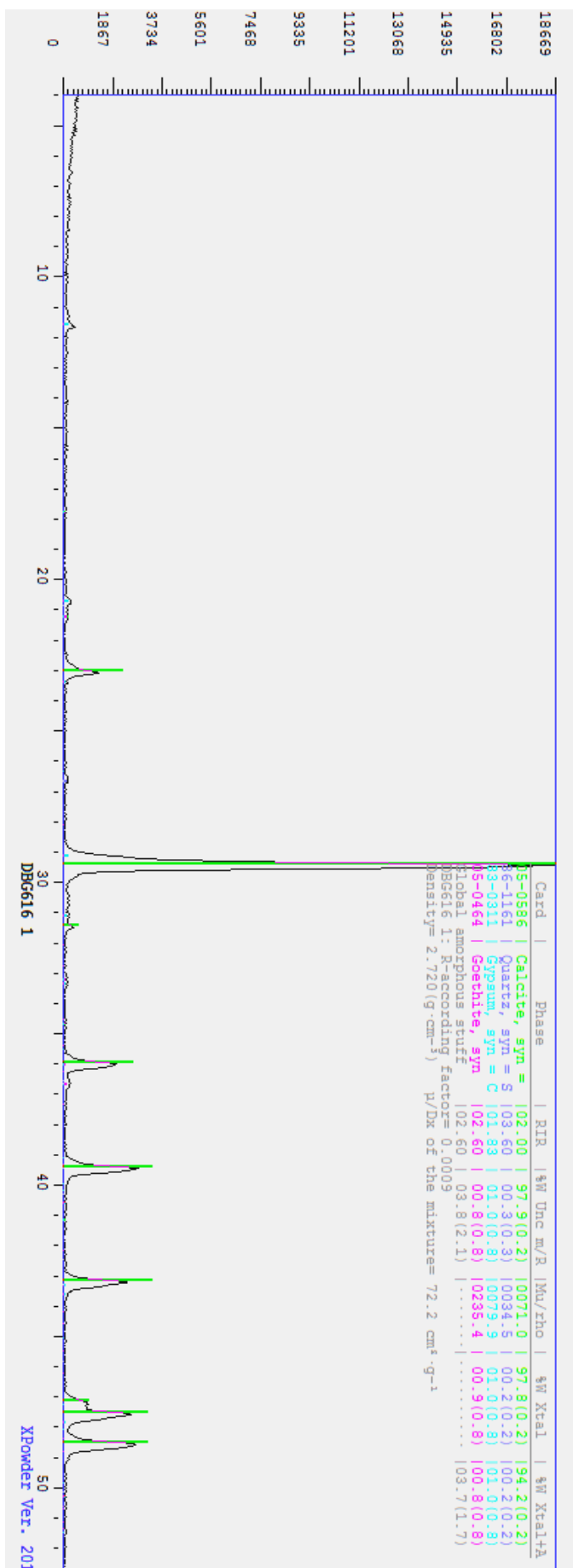
Minéralogie des calcaires roses dégradé :











ANNEXE

