

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

**Département Génie
des Matériaux**

**Laboratoire des Matériaux
Minéraux et Composites**



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Science et Génie des Matériaux
Option : Matériaux Archéologiques
Présenté par : Mr. BOUZETINE Kamel
Encadré par : Dr. BOUMCHEDDA Khaled

Caractérisation de la Pierre de taille de la casbah de Dellys et moyens de préservation

Soutenu le : 10 février 2009

Devant le Jury composé de M^{rs} :

AYADI Azzedine	Prof Université de Boumerdes	Président
HAMIANE Messaoud	M.C Université de Boumerdes	Examineur
HAMLAOUI Ali	Prof Institut d'Archéologie d'Alger	Examineur
BOUMCHEDDA Khaled	M.C Université de Boumerdes	Rapporteur

BOUMERDES 2009

Remerciements

J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadreur, Mr BOUMCHEDDE khaled. Je le remercie pour ces corrections, ses conseils éclairés et sa constante de disponibilité et sa grande qualité humaine.

Je tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à tout le membre de jury.

Mes plus sincères remerciements vont aussi a tous ceux et celles qui ont participé à réalisation de ce travail :

Mr HAMIANE messaoud chef de promotion magister matériaux archéologique.

Mr. CHERIFI rabeah et Mlle WALD CHIKH zohra (ORGM Boumerdes).

Mr SAIDI Mohammed chef de département génie des matériaux université de Boumerdes.

Mes pensées vont également à toute ma famille ma mère, mon père, mes frères et sœurs en particulier fadila et a ma fiancée Farida, et tous mes amis pour leur soutien et leur encouragement permanent.

SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION GENERALE	06

PREMIERE PARTIE : BIBLIOGRAPHIE

Chapitre 1 : Notions Générales sur les Roches et la Pierre de Taille

1.1. Notions générales sur les roches	10
1.1.1. Introduction	10
1.1.2. Le cycle de formation des roches	10
1.2. Les roches ignées	14
1.3. Les roches sédimentaires.....	18
1.4. Les roches métamorphiques	20
1.5. Généralités sur la pierre de taille.....	23
1.5.1. Présentation du matériau.....	23
1.5.2. Fabrication et travail de la pierre de taille.....	23
1.5.3. Qualités des pierres de construction.....	24

Chapitre 2 : Facteurs et Mécanismes de Dégradation de la Pierre de Taille

2.1. Introduction.....	27
2.2. Les altérations d'origine physiques.....	28
2.2.1. Les effets du vent et de la pluie.....	28
2.2.2. Les changements de température.....	29
2.2.3. L'humidité.....	31
2.2.4. Les effets du gel.....	33
2.2.5. L'action du feu.....	34

2.3. Les altérations d'origine chimiques.....	35
2.3.1. Les dissolutions.....	35
2.3.2. Les altérations liées à des concentrations de sels.....	36
2.3.3. Polluants atmosphériques.....	43
2.4. Les altérations biologiques de la pierre.....	46
2.4.1. Les bactéries.....	46
2.4.2. Les algues.....	47
2.4.3. Lichens.....	49
2.4.4. Les végétaux supérieurs.....	49
2.5. Autres formes de dégradation.....	51

Chapitre 3 : Moyens de préservation de pierres de taille

3.1. Préservation contre l'eau et l'humidité.....	57
3.1.1. Introduction.....	57
3.1.2. Méthodes de lutte contre l'ascension capillaire.....	58
3.1.3. Méthodes de lutte contre les infiltrations de pluie.....	62
3.2. Le Nettoyage.....	65
3.4. Réfection des maçonneries.....	69

Chapitre 4 : Casbah de Dellys

4.1. Situation géographique.....	72
4.2. Historique de la Ville de Dellys.....	72
4.3. La Casbah de Dellys.....	75
4.4. Description de la Casbah et ses constructions.....	75

DEUXIEME PARTIE :

CARACTERISATION DE LA PIERRE DE TAILLE DE LA CASBAH DE DELLYS

Chapitre 1 : Identification de la pierre de taille de la Casbah de Dellys

1.1. Echantillonnage et codification	82
1.2. Observation visuelles.....	82
1.3. Détermination des caractéristiques physiques.....	83
1.4. Détermination de la Composition chimique.....	85
1.5. Détermination de la Composition minéralogique.....	86
1.6. Analyse pétrographique sur lame mince.....	89
1.7. Détermination des caractéristiques mécaniques.....	94
1.8. Conclusion.....	95

Chapitre 2. Etude de l'altération de la pierre de Dellys

2.1. Introduction.....	97
2.2. Les modifications physiques.....	97
2.3. Les modifications minéralogiques	98
CONCLUSION GENERALE.....	104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	106
ANNEXE	109

INTRODUCTION GENERALE

La ville de Dellys est connue pour être une ville qui fait partie du patrimoine National, son histoire remonte très loin dans le temps, on lui attribue le nom de RUSUCCURU (le cap du poisson) du temps de Carthaginois, ADYMA à l'époque romaine. Le nom DELLYS actuel fait référence parait-il, à l'appendice de terre qui pénètre dans la mer qui à la forme de la langue (LSANN), et où installé le phare du port. Ses richesses sont innombrables, et se sont accumulées à travers les différentes civilisations qu'a connues la ville depuis les romains jusqu'au Ottomans. La Casbah et la muraille qui protège la ville constituent les richesses les plus en vue.

Les bâtisses de la Casbah sont construites avec de la pierre taillée et du bois massif selon une architecture simple et admirative. Ce travail se veut une contribution au programme de restauration de la Casbah lancé par le ministère de la culture en mai 2007. Nous nous intéressons à la pierre de construction pour trouver le meilleur moyen de réhabiliter les bâtisses et leur redonner leurs beautés et leurs grandeurs d'antan.

La pierre de taille désigne tout bloc de pierre travaillé de façon à avoir une forme lui permettant d'être introduit dans une construction. Dans les premiers temps la forme, la manière d'emboîtement des pierres et l'architecture des bâtisses, suffisaient à maintenir l'œuvre sans liants, comme l'exemple des pyramides d'Egypte et celles des Incas. Actuellement la pierre est travaillée de telle manière à avoir des formes parfaites et des polis lustrant. Elles trouvent des applications dans la construction des œuvres d'art et dans le parement où elles dévoilent toutes leurs beautés.

Le choix de la nature de la pierre de taille est souvent lié à la région et surtout à la faculté de la roche d'être travaillée, par conséquent la pierre de taille est souvent d'origine sédimentaire ou métamorphiques comme les grès, les calcaires, les ardoises, et les marbres. Les pierres de granite ou de basalte sont réservées à des emplois restreint et spécifiques comme le bas des bâtisses et où les conditions sont très dures.

La nature de la pierre conditionne ses propriétés d'emploi face aux différents éléments d'altération des ses qualités; un grès ou un calcaire ne subissent pas de la

même manière les effets de la nature, le grès résiste mieux faces aux intempéries alors que le calcaire subit une altération de son intérieur en plus de sa surface [6].

La formation des croûtes constitue souvent une pathologie des pierres de tailles alors que dans le cas du calcaire, cette croûte contribue à sa protection [7]. Les facteurs d'altérations de la pierre sont fort nombreux, dans le cas de la Casbah de Dellys, sa situation géographique et le climat nous incite à relever l'influence de l'air marin, de l'humidité montante, la pluie et le vent. D'autres facteurs d'altération peuvent jouer un rôle mineur comme le gel et l'ensoleillement.

Dans tout les cas de figure, la connaissance de pierres des bâtisses doit être identifié pour solutionner les pathologies et prétendre à une restauration saine et durable.

Pour ce faire, nous présentons :

Une première partie qui comporte une bibliographie qui s'articule sur 4 chapitres;

Le chapitre 1, donne des notions sur les différentes sortes de roches avec leurs caractéristiques et leurs propriétés; ainsi qu'une présentation de la pierre de taille.

Le chapitre 2, décrit les facteurs d'altération et de dégradation de pierres de taille, Le chapitre 3 décrit les moyens mis en œuvre pour leur restauration et préservation, Le chapitre 3; donne une présentation historique et culturelle de la Casbah de Dellys.

Une seconde partie qui s'intitule " Etude de la pierre de taille de la Casbah de Dellys", regroupe toutes nos investigations d'identifications des pierres de construction de la casbah de Dellys, ainsi que le diagnostic des pathologies. Elle s'articule sur 2 chapitres;

Le premier chapitre relatif à l'identification de la pierre de taille de la Casbah de Dellys et le deuxième concerne l'étude de l'altération de la pierre de Dellys.

Enfin nous terminons par nos recommandations pour une restauration de la cité historique de la Casbah de Dellys.

PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1 :
PRESENTATION GENERALE DES ROCHES ET DE
PIERRES DE TAILLE

1.1. NOTIONS GENERALES SUR LES ROCHES

1.1.1. Introduction

On donne le nom de roches aux masses minérales qui composent l'écorce terrestre, quels que soient leur nature et leur aspect, qu'elles soient dures, molles ou pulvérulentes. D'après cette définition le sable, la terre, les cailloux sont des roches[6].

Le magma est à l'origine de la formation de toutes sortes de roches; en poussant du cœur de la terre vers la surface il formera par refroidissement les roches ignées qui à leurs tour sous l'action des éléments naturels (érosion, vent, ..) donneront les roches sédimentaires. Le processus a lieu dans un milieu aquatique par sédimentation en banc bien identifiable. Une troisième sorte de roche dite métamorphique se produit par transformations structurales et chimiques des roches sédimentaires et ignées sous l'action de la pression et de la température. Ainsi donc selon leur origine les roches peuvent être classées en trois grandes familles :

- Les roches ignées (roches du feu de la terre) qui proviennent du refroidissement du magma.
- es roches sédimentaires formées par les dépôts de roches détritiques à la surface de la terre.
- Les roches métamorphiques issues d'une transformation physico-chimique d'anciennes roches, sous l'action de la température et de la pression [12].

1.1.2. Le cycle de formation des roches

Il est bien plus compliqué que ça et le schéma suivant reprend toutes les formations possibles (Figure1), et le tableau 1 reprend toutes les différentes roches et leurs caractéristiques.

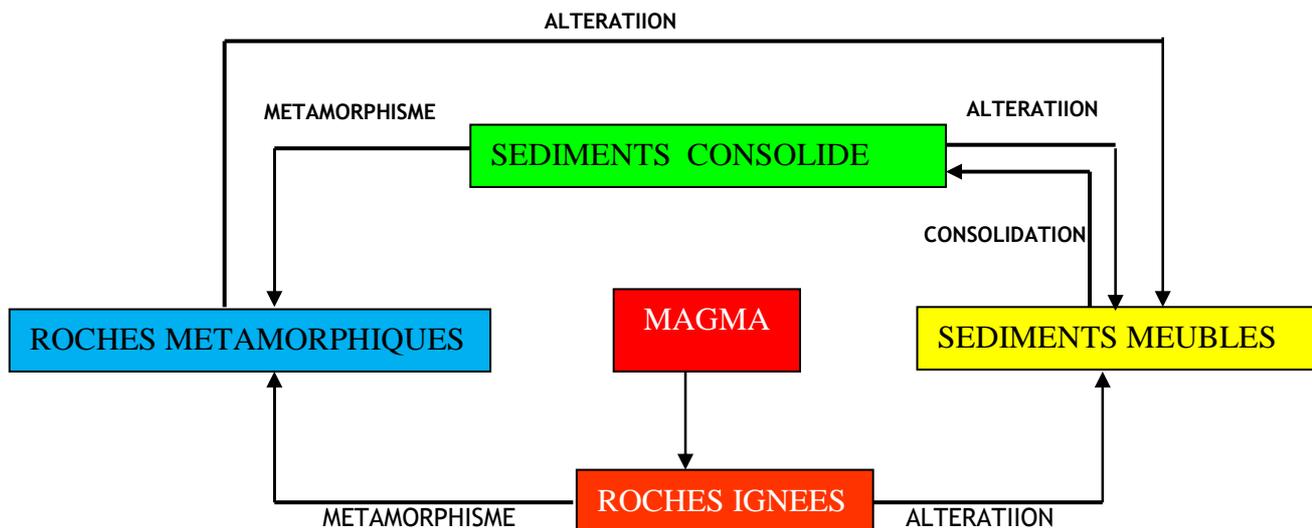


Figure 1 : Cycle de formation des roches [6].

Tableau 1 :
Classification des roches [8]

Famille de roche	Présentation	Origine	Texture	Exemples
Roches ignées	Massive	Magma (refroidissement très long)	Grenue	Granite, Syénite
		Magma (refroidissement rapide)	porphyrique Microcristalline	Diorite Basalte
	détritique	Eruption volcanique	Friables, poreuses	Pierre ponce, Cendres volcaniques
Roches sédimentaires	Sédiment chimique	Précipitation de matières en milieu aqueux	Tassée et cimentée	Gypse, albâtre
	Sédiment organogène	Restes de plantes aquatiques et d'organismes vivants	Tassée et cimentée	Les calcaires, la craie, les diatomites
	Sédiment mécanique	Dépôt de roches détritiques	cimentées	Les argiles, les conglomérats
Roches métamorphiques	Massive	Transformations de roches (sédimentaires ou ignées)	Rayée « schisteuse »	Gneiss (granitique) Quartzite (gréseuse) Ardoise, phyllade (argileuse) Marbre (calciteuse)

Un **minéral** est en général un corps naturel se présentant le plus souvent sous forme cristallisée, dont la composition chimique et les propriétés physiques sont homogènes. Un minéral est le produit des transformations physiques et chimiques se déroulant dans la croûte terrestre, en qualité d'exemple on peut citer le quartz, minéral le plus répandu constituant les grandes masses sableuse, la calcite, minéral constitutif du calcaire, le mica,... La classification des minéraux est basée sur le caractère chimique et cristallographique (tableau 2)

Tableau 2 :
Classification des principaux minéraux constitutifs des roches [6]

Classe	Nom	Composition chimique	Dureté (MOHS)	Masse volumique (g/cm ³)	
oxydes	Quartz	SiO ₂	7	2.5-2.8	
SILICATES	Silicates - feldspaths	Orthose et Microcline Albite	K (AlSi ₃ O ₈) Na (AlSi ₃ O ₈)	6-6.5 6 2.6	
	Silicates ferro-magnésiens	Olivine Pyroxènes	(Mg, Fe) 2SiO ₄ Ca(Mg, Fe, Al)((AlSi) ₂ O ₆)	6.5-7 5-6.5 3.4-3.5 3.4	
	Phyllo-silicates	Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀) (OH) ₂	2.5-4	2.8-2.9
		Biotite	K(Mg, Fe)3(AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	2.5-3	2.8-3.4
Kaolinite		Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	2	2.5-2.7	
Serpentine		Al ₄ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈ Mg ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	2.5-6	2.5-2.6	
Carbonates	Calcite	CaCO ₃	3	2.6-2.8	
	Dolomite	Ca Mg(CO ₃) ₂	3.5-4	2.8-2.9	
Sulfates	Gypse	CaSO ₄ 2H ₂ O	2	2.3	

La pierre de taille ou tout autre matériaux de construction issue de roches est caractérisée par sa **dureté**, paramètre très important dans le choix du matériau. En fait la dureté représente la résistance à la destruction mécanique de la structure du matériau et dans le cas des roches on utilise surtout l'échelle de Mohs gradué de 1 (talc) à 10 (diamant) (Tableau 3).

Tableau 03 :
Echelle de dureté selon MOHS [6]

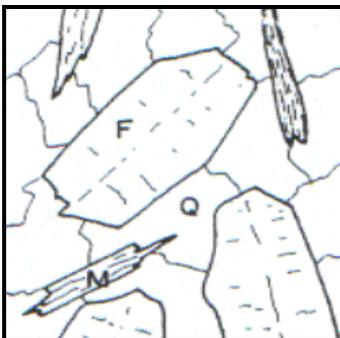
Classe	Minéral de référence	Propriété	Classement
1	Talc	Se laisse décapé à l'ongle	Minéraux tendres
2	Gypse	Rayable a l'ongle	
3	Calcite	Rayable avec pièce en cuivre	Minéraux semi-durs
4	Fluorite	Facilement rayée au canif	
5	Apatite	Rayable au canif	
6	Orthose	Rayable avec une lame d'acier	
7	Quartz	Raye le verre a vitre	Minéraux durs
8	Topaze	Raye facilement le quartz	
9	Corindon	Raye facilement le topaze	
10	Diamant	Non rayable	

1.2. LES ROCHES IGNEES

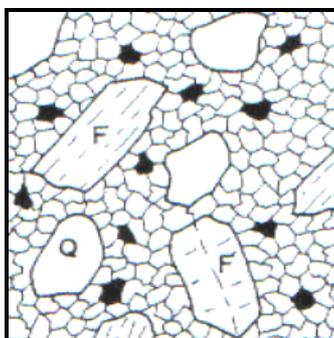
Ce sont les roches qui proviennent de la consolidation d'un magma en fusion, le magma en fusion est directement observable seulement sous la forme des laves volcanique. On distingue les roches de surface (extrusives) ou volcaniques qui se sont consolidées à l'air libre et les roches plutoniques (intrusives) de profondeur qui ont cristallisées sans venir au jour. On utilise plusieurs critères de classification [12].

- Selon la **texture** on distingue :

1. **Roche grenue** (on voit le grain), roches de profondeur la cristallisation est totale est réalisée en une seul fois, tous les minéraux ont a peu près la même dimension, ce sont les roches granitique (figure 2a)
2. **Roche microgrenue**, la consolidation s'effectue en plusieurs temps, il en résulte de gros cristaux noyés dans une pâte qui peut être entièrement cristallisée, (figure 2b).
3. **Roche microlithique** (on ne voit pas le grain) : roche de surface avec refroidissement plus rapide. La cristallisation est moins complète, de très petits cristaux entourant de gros cristaux (figure 2c).
4. **Roche vitreuse** : refroidissement très rapide de laves.



a: Texture grenue



b :Texture microgrenue



c : Texture microlitique

Figure 2 : Texture des roches magmatiques selon Guillemot [12]

$Q = \text{Quartz}$, $F = \text{feldspath}$, $M = \text{mica}$, $P = \text{pyroxenes}$

- Selon la **minéralogie**, on distingue quatre grandes familles de roches ignées :

1. Les **granites**, constitués de quartz, de feldspath, de mica, et de minéraux ferromagnésiens. Ils sont complètement cristallisés avec une structure grenue. Le granite qui est une roche plutonique la plus répandue, est plutôt clair, souvent coloré en blanc, rose, rouge. Les cristaux des minéraux ont le plus souvent une taille de 2 à 5 millimètres. Parfois, la présence d'un minéral, par exemple de l'amphibole, du pyroxène, en proportion un peu plus importante peut modifier l'aspect de la roche, il existe en fait une grande variété de granites [3].

2. Les **syénites**, constitués exclusivement de feldspath (orthoclase), elles se prêtent mieux au polissage que les granites et elles sont plus foncées, grises, roses verdâtres.

3. Les **diorites** ; cette famille de roches, de teinte souvent grise mais aussi verte foncée jusqu'à vert noire. Elles sont constituées essentiellement de plagioclases (andésine, oligoclase, albite), avec des minéraux d'amphibole et, parfois, du pyroxène, ne présentent pas de quartz. Elles sont difficiles à façonner mais donnent un bon poli.

4. Les **basaltes** et les **gabbros**, constitués de plagioclase calcique (labrador, bytownite, anorthite), de pyroxène, et d'olivine, avec une certaine quantité de verre volcanique. Ils sont noirs mais s'altèrent avec le temps en donnant les couleurs suivantes : vert foncé, brun foncé, rougeâtres.

- Selon la composition chimique : La composition chimique des roches ignées réfère à la teneur en pourcentage de silice (SiO_2), de potassium (K_2O), de sodium (Na_2O), de calcium (CaO), de fer (FeO) et de magnésium (MgO), sous formes d'oxydes. Des roches ignées de composition acides, telles le granite et la rhyolite, sont riches en quartz et en feldspaths potassiques et sont généralement claires. Des roches ignées de composition intermédiaires et basiques, telles la diorite et le gabbro respectivement, contiennent moins de silice et de feldspaths potassiques mais plus de minéraux ferromagnésiens riches en fer et magnésium et des feldspaths plagioclases sodiques. Ces roches ignées sont généralement plus foncées

que les roches de composition acides. Enfin, les roches ignées de composition ultrabasiques, telle la péridotite, sont très riches en minéraux ferromagnésiens et très pauvres en feldspaths plagioclases calciques. Ils ne contiennent jamais du quartz. Ces roches sont beaucoup plus foncées que les roches de composition acides et un peu plus foncées que les roches de composition intermédiaires et basiques [3].

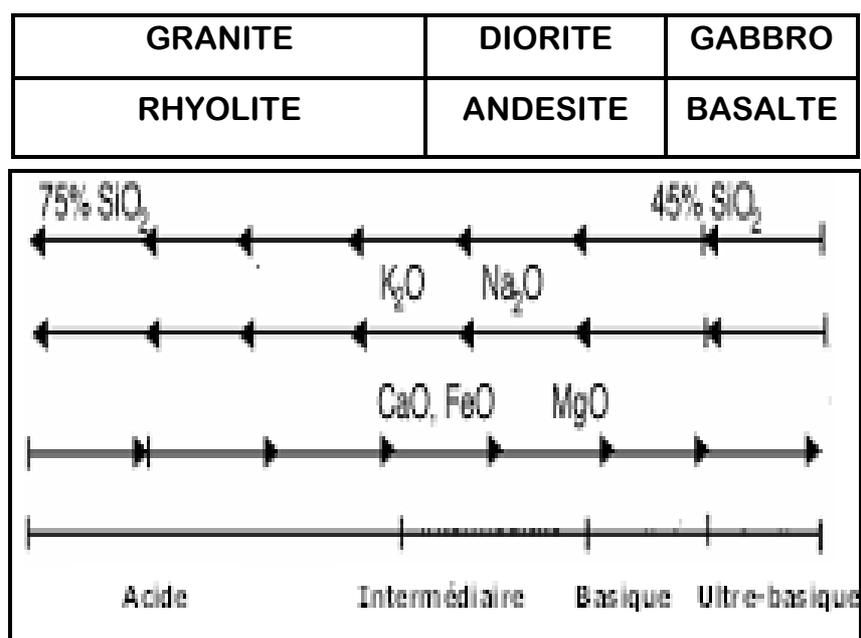


Figure 2 : composition chimique des roches ignées [3].

Tableau 4 :

Principales roches ignées et leurs caractéristiques [6]

Type de roche	Masse volumique (Kg/m ³)	Masse spécifique (Kg/m ³)	Porosité vol. %	Résistance à la compression (MPa)
Granite	2400-3100	2600-3200	0-2	100-300
Syénite	2400-2900	2700-2900	0,4- 1,4	150-200
Diorite	2700-2900	2800-3000	0,5- 1,2	180-200
Gabbro	2900-3160	2900-3160	0,5- 1,2	100-280 (350)
Basalte	2700-3300	2700-3300	0-1	100-150

Tableau 5 :
Principales roches magmatiques en fonction de leur composition et de leur structure [9]

Les roches magmatiques		Roches à feldspath				Roches sans feldspaths avec péridots
		Feldspaths alcalins présents Couleur claire		Feldspaths plagioclases seuls Couleur foncée		Péridotites
Origine et gisements	Structure	Avec quartz	Sans quartz	Plagioclase acide	Plagioclase basique	
Plutoniques	Solidification profonde et lente, Cristallisation complète Massifs et filons	Grenue	Pegmatite Granite Granulite	Syénite	Diorite Diorite quartzifère		Gabbro
		Microgrenue	Micro granulite	Micro syénite	Micro diorite	Micro gabbro
Volcaniques	Cristallisation en deux temps Filons, dômes, coulées	Microlitique	Rhyolite Porphyre quartzifère	Trachyte Phonolite	Andésite Porphyrite	Basalte
	Pas de cristallisation Coulées et projections	Vitreuse	Rétinite et obsidienne : aspect du verre, cassure brillante. Pierre ponce, scories : structure poreuse, plus légère que l'eau.			

1.3. LES ROCHES SEDIMENTAIRES

Les roches sédimentaires sont les roches qui proviennent de l'altération et de la destruction des roches ignées et métamorphiques ou sédimentaires pré-existants. Elles sont le résultat de l'accumulation et du compactage des sédiments débris d'origine minérale mais aussi d'origine organique (restes de végétaux ou d'animaux, fossiles). Leur formation peut être par simple sédimentation, et là on parle de roches détritiques ou terrigènes, et/ou par précipitation chimique ; ce sont les roches Biogènes [12].

La particularité des roches sédimentaires est de montrer un plan stratifié de couches parallèles.

Parmi les roches terrigènes seuls les grès présentent beaucoup d'intérêt pour la fabrication de pierre de taille. Ce sont des roches gréseuses issues du cimentage des grains de sable par un ciment qui peut être siliceux, calcaire, ferreux, et argileux. Les grès siliceux ont de meilleures performances pour la fabrication de la pierre de taille. Selon la taille des grains de quartz on parle :

- De **Rudites**, grains en majorité plus grands que 2 mm.
- D'**Arénites**, grains en majorité compris entre 2 mm et 62 μm ,
- De **Lutites**, grains en majorité plus petits que 62 μm [12].

Aux roches carbonatées se rapportent les roches carbonatées bioclastiques qui sont le résultat de l'accumulation des coquilles et de végétaux comme par exemple la craie et certains calcaires, et les roches carbonatées physico-chimiques qui sont le résultat de la précipitation directe (par voie chimique) des carbonates (calcaire,...), la dolomie, la magnésite, et autres. Ainsi donc on distingue :

Les roches salines sont représentées par le gypse, et notamment l'albâtre qui est utilisé dans la pierre de taille.

Et enfin les conglomérats et brèches carbonatées. Les brèches sont des roches composées de fragments anguleux cimentés, alors que les conglomérats sont des roches détritiques formées d'au moins 50 % d'éléments de diamètre supérieur à 2 millimètres.

Tableau 6 :

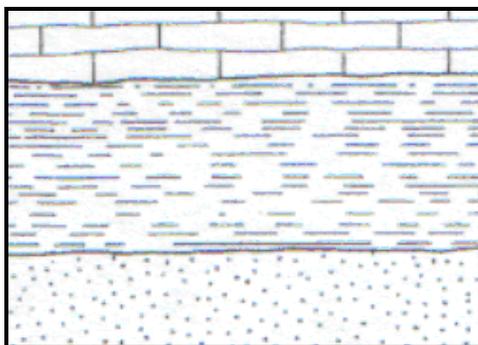
Principales roches sédimentaires et leurs caractéristiques [6]

Roche	Masse volumique (Kg/m³)	Masse spécifique (Kg/m³)	Porosité vol. (%)	Résistance à la compression (MPa)
Grès	2000-2850	2000-3500	0-25	30-250
Calcaire	2100-2600	2000-2900	2-24	80-180
Conglomérat	2000-2800	2200-3000	5-15	30-160
Travertin	2400-2900	2400-3100	2-20	60-200

1.4. LES ROCHES METAMORPHIQUES

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches ignées ou sédimentaires sous l'effet de température et/ou de pressions élevées. Deux grands types de métamorphisme produisent la majorité des roches métamorphiques: le métamorphisme de contact et le métamorphisme régional. Un troisième type est plus restreint : le métamorphisme de chocs. Les roches métamorphiques subissent souvent des déformations, qui entraînent l'apparition de structures particulières dans la roche. On peut en distinguer 3 types qui se succèdent avec l'intensité du métamorphisme :

- **Une stratification (litage)** qui est issue des phénomènes de sédimentation (figure 3a). Elle est perpendiculaire aux forces en jeu (pression lithostatique). Elle concerne le débit de la roche.
- **Une schistosité** où la roche se débite en feuillets de même composition minéralogique. Cette disposition apparaît à partir de 5 km de profondeur. Elle peut apparaître lors de la diagenèse (pression lithostatique) mais elle est souvent à relier aux contraintes tectoniques. Le plus souvent la schistosité est perpendiculaire ou oblique aux forces en jeu (figure 3b).
- **Une foliation** : où certains minéraux de la roche se transforment. Les nouveaux minéraux qui apparaissent s'aplatissent et s'orientent selon la direction de la schistosité. Ils peuvent se regrouper sous forme de lit. Le front de foliation serait situé vers 10 Km de profondeur (Micaschistes, gneiss) [3,12].



(a) Litage



(b) Schistosité

Figure 4 : Formes de métamorphisme [12].

Les principales roches métamorphiques qui intéressent le domaine de la construction sont les suivantes:

Tableau 7 :
Principales roches métamorphiques [12]

Roche métamorphique	Origine
Gneiss	Granite
Quartzite	Grès siliceux
Ardoise, schiste, micaschiste	Argiles
Marbres, serpentinites	Calcaire

Les gneiss sont des roches composées, comme les granites de feldspath, de quartz et de micas. Elles ont un aspect rayé suite à la disposition des minéraux par bandes, leurs couleurs sont grises, roses, rougeâtres, plus rarement verdâtres. Elles peuvent avoir différentes textures ; oillée (gneiss oillés), glanduleuse, rubanée, granitoïde, etc... (Figure 4). On les utilise dans le parement de façades et revêtements des murs intérieurs, dallage et escaliers intérieurs et extérieurs.

Les quartzites sont des grès quartzeux très durs, et possèdent de grandes résistances mécaniques, la résistance à la compression atteint 400 MPa. Elles sont stables face aux éléments naturels (pluie, vent), et elles ont les mêmes emplois que ceux des gneiss.

Les phyllades (ardoises et schistes) sont des schistes argileux homogènes et compacts a grains très fins, qui ont subit un métamorphisme léger. Elles ont acquis une texture microcristalline orientée et une schistosité plane et régulière. Leur couleur est grise foncée, quelquefois noire, Elles se fendillent facilement en plaques minces. Elles ont une grande durée de vie et conviennent très bien aux couvertures des habitations, et aux revêtements de façades (bardage).

Les marbres sont des calcaires cristallins (principalement calcite) dans les quels les cristaux de calcite sont soudés entre eux sans vide et sans ciment. Ils ont une masse homogène et bien compacte. Leur dureté est faible (3-3,5 Mohs) et ils se

prêtent très bien au sciage et au polissage. Leur utilisation en pierre de taille à l'extérieur n'est pas conseillée car les marbres s'altèrent rapidement face aux agents atmosphériques et plus particulièrement face aux acides.

Les serpentinites sont constituées de serpentines accompagnées de chlorites et de minéraux ferromagnésiens. Elles sont vertes, rougeâtres, compactes et possèdent de grandes résistances à la flexion. Elles résistent bien aux acides et relativement bien au feu. [6, 12,13]

Tableau 8:
Principales roches métamorphiques et leurs caractéristiques [6]

Roche	Masse volumique (Kg/m ³)	Masse spécifique (Kg/m ³)	Porosité %	Résistance à la compression (Kgf/cm ²)
Gneiss	2900-3000	2800-3200	0-2	140-200
Quartzites	2600-2700	2700-2900	0-1	240-250
Schistes	2600-3000	2700-3100	0-3	100-160
Ardoise	2600-3000	2700-3100	0-3	100-160
Marbres	2600-2800	2700-3100	0-5	800-220

1.5. GENERALITES SUR LA PIERRE DE TAILLE

1.5.1. Présentation du matériau

La pierre de taille désigne tout bloc de pierre travaillé de façon à avoir une forme lui permettant d'être introduit dans une construction. Son emploi remonte très loin dans l'histoire de l'homme. Elle a été l'un des premiers matériaux à côté du bois, utilisé par l'homme pour bâtir ses abris. Dans les premiers temps la forme, la manière d'emboîtement des pierres et l'architecture des bâtisses, suffisaient à maintenir l'œuvre sans liants, comme l'exemple des pyramides d'Egypte et celles des Incas. Actuellement la pierre est travaillée de telle manière à avoir des formes parfaites et des polis lustrant. Elle trouve d'innombrables applications, dans la construction de bâtisses solides et fières (citadelle, châteaux, cathédrales, ponts,..., dans des œuvres d'art et dans le parement où elle dévoile toutes ses beautés. Les constructions de pierres gardent leurs statures et traversent le temps sans difficultés.

- La nature de la pierre à tailler varie selon les régions, cela peut être du calcaire, du grès, du granite, de l'ardoise, du marbre,... Actuellement la pierre est exploitée et mise sur le marché comme tous matériaux de construction.

Pour la construction, on utilise trois sortes de pierre de taille qui se distinguent par leur dureté. Les pierres les plus dures sont utilisées pour les parties basses de l'édifice, les moyennement dures pour les étages intermédiaires et enfin les pierres les plus tendres terminent l'édifice, c'est-à-dire les étages supérieurs.

Les formes de pierres sont multiples, pour la construction de murs on utilise des blocs muraux juste ayant la forme de briques dits bloc éclaté, alors que pour le dallage, le parement de façades et le revêtement des sols les pierres sont sciées et polies. Des formes sculptées peuvent être produites [6].

1.5.2. Fabrication et travail de la pierre de taille

Le travail de la pierre de taille a beaucoup progressé, mais on peut concevoir que le travail artisanal se limitait à donner une forme à la pierre pour qu'elle puisse se mettre en place pour la formation de murs. Le découpage de

grands blocs se faisait par de simples burins qu'on introduisait par des coups de masses. La finition de la pierre est réalisée par des artisans au moyen de marteaux et de burins. Dans certains cas des pierres de façades sont sculptés avec des motifs se rapportant à la région, ou la religion, ou enfin encore à la civilisation de ce temps.

Actuellement les machines très performantes permettent l'obtention de pierres de taille de très hautes qualités. On peut résumer les étapes de fabrications comme suit :

- Extraction et découpage de grands blocs par des machines équipées de scie en aciers et recouvert de diamant synthétique.
- Façonnage qui consiste au sciage, débitage et profilage.
- Finition qui peut être manuelle mais coûteuse et mécanique, dans ce cas la pierre est mécaniquement rayée, ajustée, et polie [6].

1.5.3. Qualités des pierres de construction

Les pierres sont connues pour leurs grandes résistances mécaniques à la compression et à la flexion, mais leurs qualités ne se limitent pas aux propriétés mécaniques. Selon leur nature les pierres exhibent les qualités suivantes :

- homogénéité,
- dureté, et une résistance à l'usure et aux chocs,
- résistance aux variations des facteurs atmosphériques et climatiques
- imperméabilité et ingélivité
- adhérence au mortier de pose
- bonne résistance aux agents chimiques (solvants, acides, alcalis)
- bonnes caractéristiques thermiques (conductivité thermique, dilatation)

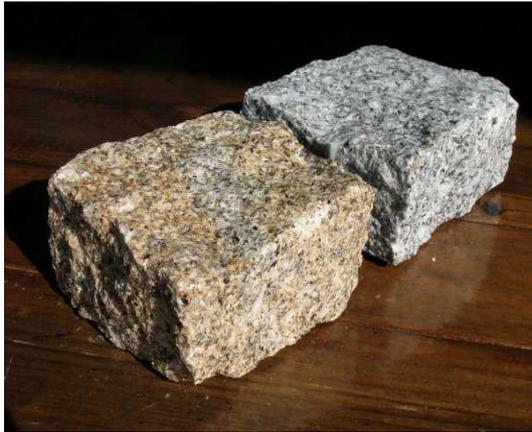


Figure 5 : quelques types de pierres de taille.



b): Fort turque de Tamenfouss (Alger)



a) : kalea Beni Hamad (M'sila).

Figure 6 : Constructions en pierre de taille.

CHAPITRE 2 :
FACTEURS ET MECANISMES DE DEGRADATION
DE LA PIERRE DE TAILLE

2.1. INTRODUCTION

Toutes les études sur les mécanismes de dégradation des pierres à bâtir adoptent une approche qui se divise en deux groupes:

- Le premier concerne la qualité de la roche dont est issue la pierre et, suivant leurs caractères minéralogiques et pétrographiques, leur résistance aux intempéries.

- Le second groupe s'intéresse à toutes les influences et à tous les facteurs d'altération de la pierre qu'on désigne par «weathering», et qui se traduit par "altération sous intempéries" [7].

Selon le premier groupe, c'est donc, la nature de la roche qui mise en exergue, un calcaire ou un grès d'origine sédimentaire n'aura pas les mêmes performances qu'un granite ou un basalte. Alors que selon le second groupe ce sont les facteurs exogènes qui sont mis en exergue.

La dégradation ou l'altération des pierres naturelles se distingue par une perte des propriétés d'emploi, qui peuvent être de plusieurs ordres, par exemple ; la perte en résistance mécanique dans la tenue des constructions, la perte en qualité esthétique (couleur, perte de motifs sculptés), la perte en isolation, etc,.... Toutes ces altérations ont le plus souvent les origines suivantes :

1. Les altérations d'origines physiques comme la perte de matière par dissolution, création de pores et de cavitations.
2. Les altérations d'origines chimiques, dans ce cas la surface de la roche devient le siège des réactions chimiques sous l'action des intempéries ou de gaz nocifs (fumées, gaz d'échappement des voitures,...). Cela n'exclue pas certaines transformations internes sous l'action des remontées capillaires.
3. Et enfin les altérations d'origine biologiques dans les quelles des organismes - algues, lichens, mousses ou bactéries - jouent un rôle déterminant.

Ces différentes altérations se lient le plus souvent à un syndrome (construction face à la mer, région montagneuse humide, désert), qu'ils interfèrent et qu'ils se conjuguent les uns aux autres. Les pierres subissent alors des

transformations de leur minéralogie et de leur état physique (porosité, aspect, couleur). Ce nouvel état est d'autant plus instable que les conditions climatiques varient et que les pierres présentent de grandes surfaces de contact avec l'air et l'eau.

2.2. LES ALTERATIONS D'ORIGINE PHYSIQUE

Les altérations physiques sont notamment superficielles et sont causées par les éléments naturels (vent, pluie, érosion,...) auxquels s'ajoutent les effets de changements de températures, les effets du gel, du feu,... provoquent la dissociation des pierres sous forme de grains ou d'éclats de roches mais sans en modifier la composition minéralogique [7].

2.2.1. Les effets du vent et de la pluie

Le vent par son action continue et par les particules qu'il transporte (cas de quartz en suspension par exemple) peut être un puissant facteur d'altération de la pierre. Dans les régions ventées et désertiques son action est analogue à celle du sablage et si elle est associée à la pluie, elle est très destructive et dévastatrice. La connaissance de climat associé à la direction du vent est indispensable pour prétendre lancer un projet de préservation des sites historiques [8].

L'eau des pluies provoque des altérations différentes selon la nature de la pierre ou de la roche; les pierres d'origine sédimentaires (calcaires, grès) subissent plus de dégâts que les pierres granitiques. Sur les roches litées, formées d'une alternance de lits durs et tendres les ruissellements provoquent des ravinements inégaux par creusement des lits les plus tendres tandis que les roches homogènes sont creusées de façons uniformes [7]. L'intensité de ces ravinements dépend du climat, des conditions d'exposition (orientation des pluies et de vents), de la place des pierres dans les murs (haut ou bas), ainsi que le type de la structure sur laquelle elles sont impliquées : sculptures, corniches, murs verticaux ou inclinés, etc. figure (7 et 8).

PERTE DE RELIEF



Figure 7: Erosion de relief sculpté en pierre Calcaire [15].



Figure 8 : Erosion d'un mur par lessivage d'eau de la Casbah de Dellys

2.2.2. Les changements de température

Un changement de température correspond toujours à un changement de volume, c'est le phénomène physique de dilatation-contraction sous l'action de la température. Répété avec fréquence, il peut diminuer la qualité des matériaux par l'apparition de fissurations ou même des éclatements de la pierre. D'autant plus que certains minéraux présentent une grande anisotropie dans la dilatation thermique, ce qui accentue le phénomène. Le cas de la calcite est frappant; minéral constituant les pierres calcaires et le marbre, à une forte dilatation dans son axe principal (l'axe c) mais une contraction dans le sens inverse (figure 9). Un échauffement souvent répété fait éclater les intergranulaires des grains de la calcite, et le marbre pourrit et peut tomber en grains [8].

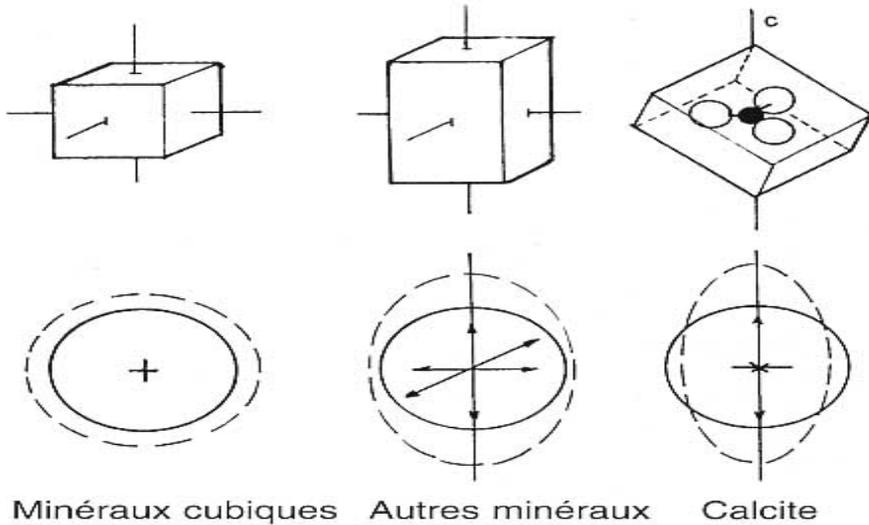


Figure 9: Schéma de dilatation dans les minéraux [2].

Les dégâts peuvent être dus aux dilatations-contractions thermiques qui se produisent naturellement par l'alternance régulière des températures dues aux ensoleillements et à la nuit (qui peuvent dépasser 50 °C), et aux structures elles-mêmes; les pierres à forte dilatation thermique peuvent s'éclater si celle-ci ne trouvent pas assez d'espace libre pour se dilater, exemple des pierres situées entre deux piliers jointes avec un mortier qui n'est pas souple.

Le phénomène de dilatation thermique est caractérisé par le coefficient linéaire de dilatation thermique qui est donné par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0} \times \frac{1}{\Delta t} \quad (1)$$

La dilatation volumique peut être exprimée par la relation suivante :

$$\beta = 3\alpha \quad (2)$$

Pour comprendre la formation de microfractures par dilatation anisotrope, considérons une coupe dans un marbre calcaire, dont les grains sont séparés par des limites planes, formant un réseau hexagonal. Si tous les grains ont des axes cristallins parallèles, il y a dilatation globale dans un sens et contraction dans l'autre, mais pas d'ouverture entre grains. Par contre si deux grains parallèles 1 et 2 sont en contact avec un grain perpendiculaire 3 (figure 10), les grains 1 et 2 s'écartent, car le grain transverse 3 empêche la contraction. La largeur de cette ouverture peut se calculer : pour une température s'élevant de 20 à 60°C, elle est de 0.9 µm pour des grains de 1mm, de 0,18 µm pour des grains de 0,2 mm. Les ouvertures devraient donc être plus importantes pour les marbres à gros grains. Le calcul de la contrainte d'extension indique environ 23 MPa, valeur supérieure à la résistance à la traction de la plupart des marbres [2].

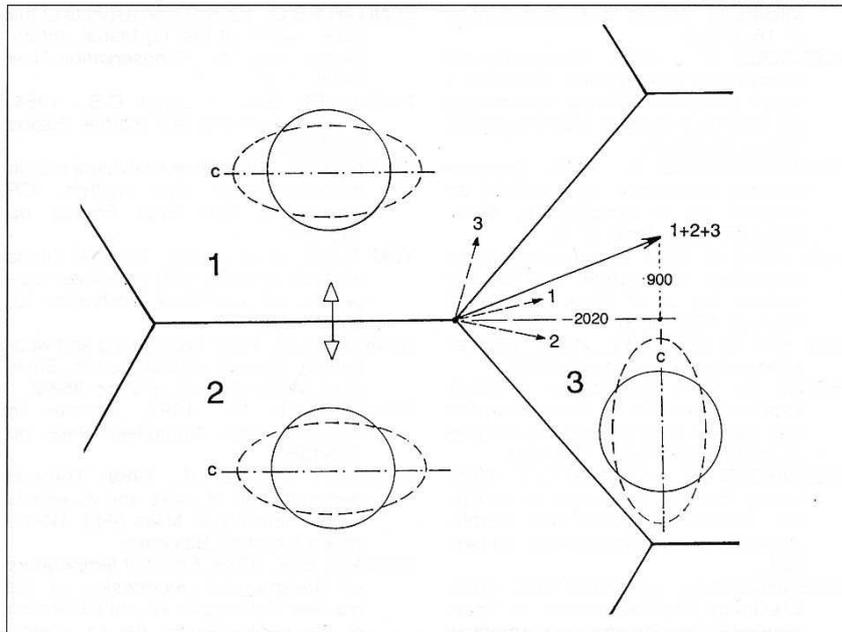


Figure 10 : Apparition de contraintes de tension entre des cristaux de calcite d'orientation différente [2].

2.2.3. L'humidité

L'humidité, dans les aspects variés de son apparition est l'ennemi numéro un de tous les matériaux et de toutes les constructions. Elle produit des altérations chimiques autant que physiques. Il existe plusieurs sources et plusieurs sortes d'humidité, aux conséquences très différentes. Il faut apprendre à les distinguer pour établir un diagnostic correct qui permettra de prendre les mesures indispensables ou de proposer des remèdes justes et efficaces [7].

- **Humidité de carrière**

Dans la roche, en carrière, les intergranulaires d'une pierre ou « pores » sont remplis d'une humidité originelle qui s'appelle ordinairement « humidité de carrière ». Dans cet état d'humidité, quelques blocs de pierres sont en danger de gel et ne doivent pas être mis en plein air avant d'avoir atteint un certain degré de sécheresse. Indépendamment de cette humidité originelle se rencontrent aussi des cas d'humidité secondaire, à savoir d'une humidité acquise plus tard. Faute d'isolation, une pierre déjà sèche peut être à nouveau pénétrée par l'eau ascendante et être ensuite victime du gel.

- ***Humidité de la pluie et de la brume***

L'effet le plus simple en est une corrosion chimique sur les pierres assez solubles, pratiquement sur les calcaires polis ou « marbres » des tailleurs de pierre. La perte du poli s'ajoute à une perte de couleur; on dit que le marbre devient aveugle. Mais un effet beaucoup plus important est celui de la périodicité des pluies. Il existe un changement continu d'humidité et de sécheresse, «rythme de l'humidité» selon, ce rythme est une des causes principales de la formation de croûtes.

- ***L'humidité montante du sol***

Dans les murs toujours poreux et sans isolation horizontale, l'humidité du sol, enrichie par des sels solubles, monte par capillarité, quelquefois aussi par diffusion, jusqu'à une certaine hauteur, telle que la surface trempée soit assez grande pour que l'humidité venant du bas puisse s'évaporer. La surface humide a conséquemment toujours dans un cas particulier la même hauteur relative. Si cette surface est couverte par un enduit imperméable, quel qu'il soit, l'humidité est obligée de monter plus haut pour atteindre une autre hauteur (voir figure 11). Après l'évaporation, les sels solubles s'accumulent et vont cristalliser dans les parties les plus hautes de la zone d'imprégnation (efflorescences). Il y a plusieurs sels dans le sol; la plupart d'entre eux sont des sulfates. A cause de son hygroscopicité particulière, le sulfate de magnésium supplante les autres et se rencontre dans les efflorescences des murs humides ; en fait, il est presque toujours confondu avec le salpêtre. Ces sels cristallisants provoquent une accélération très notable du développement des croûtes en toutes sortes de pierres [8].

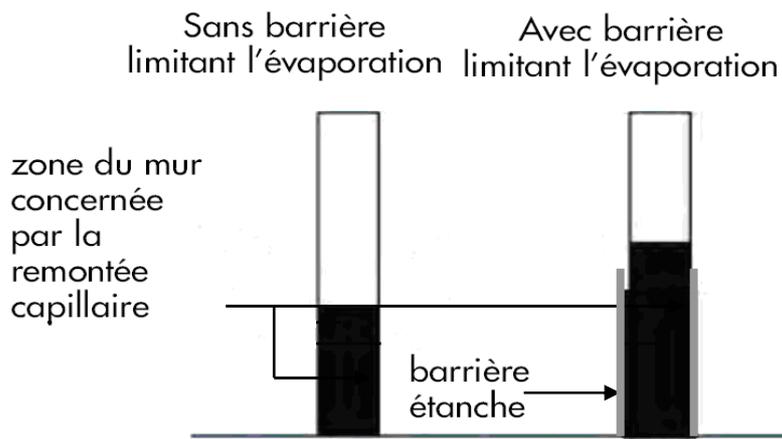


Figure 11 : Augmentation de niveau d'ascension capillaire en présence d'une barrière étanche horizontale

2.2.4. Les effets du gel

Les conséquences du gel sont connues ; le changement de l'eau en glace entraîne une augmentation de volume de 9 %, qui peut être destructive pour les pierres. La répétition des séquences gel/dégel entraîne un effet de fatigue du matériau dont la cohésion diminue progressivement. Le phénomène entraîne des tensions mécaniques dues à la glace (14 kg/m²) provoque des ruptures, d'abord microscopiques et ensuite macroscopiques (Figure 12 et 13).

Il existe une teneur en eau dite «critique» au-delà de laquelle le matériau subit des altérations ; elle varie, suivant les structures et la nature des minéraux, de 60 % à 100 % du volume totale des vides. Au-delà de cette teneur critique l'espace libre est insuffisant pour que la glace se développe librement. Les pierres à pores fins et ouverts atteignent très facilement cette valeur, par contre les pierres à gros pores ne l'atteignent que difficilement.

Les pierres à pores fins sont donc plus gélives que les pierres à gros pores dans les mêmes conditions d'exposition.

Le mécanisme de la gélification dépend (1) des conditions climatiques, (2) des propriétés du milieu poreux de la pierre, (3) de la situation des pierres sur le bâtiment (pierre abritée, pierre en zone humide ou lessivée), et enfin (3) de pierres sèches ou au contraire fortement imbibées d'eau [7,8,18].

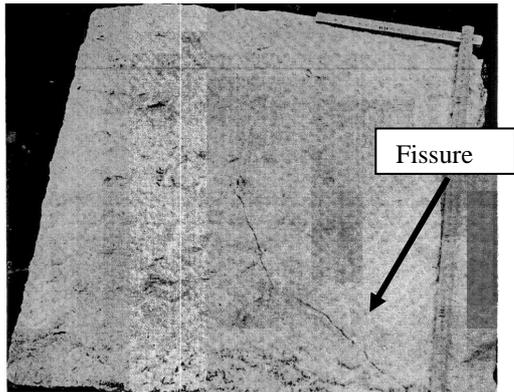


Figure 12 : Bloc de calcaire fendu par le gel.

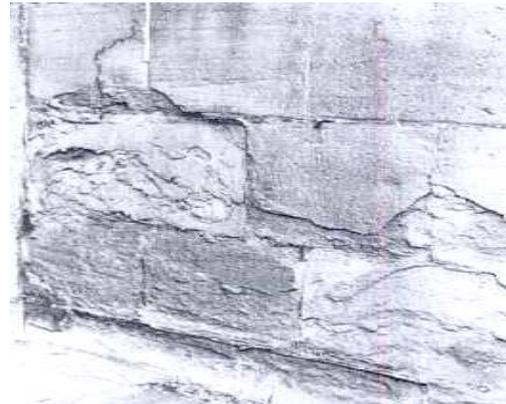


Figure 13 : Altération de grès par le gel [7]

2.2.5.L'action du feu

Le maximum de chaleur est atteint lors des incendies. L'effet du feu est premièrement causé par la rapidité de l'échauffement. Les parties extérieures des pierres léchées par le feu sont soumises à une rapide dilatation de volume. Mais la transmission de la chaleur à l'intérieur de la pierre ne va pas à la même vitesse. L'intérieur des pierres reste froid et provoque des tensions qui outrepassent la résistance du matériau. Par voie de conséquence, des plaques et des morceaux éclatent les uns après les autres.

Un cas spécial est celui des pierres contenant un fort pourcentage de quartz. Cette matière subit un changement de structure à une température de 573 degrés. Ce changement est accompagné par une brusque dilatation de 4,5 % qui fait exploser toute pierre quartzeuse [8].

2.3. LES ALTERATIONS D'ORIGINE CHIMIQUES

2.3.1. Les dissolutions

Les dissolutions se développent sur les matériaux carbonatés, pierres calcaires ou mortiers à la chaux, exposés à des lessivages. Sous l'effet des dissolutions, les pierres subissent une usure superficielle qui empêche l'accumulation de poussières et donc l'encrassement des surfaces. Lorsque les dissolutions se produisent sur des roches hétérogènes, comme les molasses, constituées par la juxtaposition de lits plus ou moins riches en calcaire, elles provoquent une usure différentielle de la pierre qui entraîne la mise en relief des lits les plus durs. Dans les grés carbonatés, la dissolution de la matrice calcaire facilite le dessertissage des grains de quartz, provoquant des altérations semblables aux ravinements.

Les dissolutions sont d'autant plus intenses et plus rapides que les eaux sont plus acides, c'est pourquoi elles sont amplifiées par la pollution atmosphérique qui augmente l'acidité des eaux de pluie. Sur les bâtiments les variations d'acidité des eaux de ruissellement se traduisent par des dissolutions d'intensité différente. Les zones soumises aux pluies fouettantes, comme les appuis de fenêtre, les cordons et les corniches, ainsi que les parties hautes des murs subissent de fortes dissolutions. Dans les parties basses des murs, les eaux de ruissellement qui se sont chargées en carbonates dans les parties sus-jacentes provoquent des dissolutions plus faibles [7,15].

Les dissolutions se développent sur les matériaux carbonatés, pierres calcaires ou à teneur considérable en calcaire tels que certains grés selon la réaction suivante :



Le tableau 9 suivant donne les vitesses de dissolutions des principaux minéraux à température de 25°C et PH=5.

Tableau 9 :

Logarithme de vitesses de dissolutions des minéraux a T=25° C et PH=5[3].

<i>minéral</i>	<i>log (vitesse dissolution)</i> mol /m ² /sec
quartz	-13.39
épidote	-12.61
Mg-chlorite	-12.52
hornblende	-12.40
K-feldspath (microcline)	-12.50
albite	-12.26
pyroxène (diopside)	-10.15
verre basaltique	-9.6
olivine (forstérite)	-9.5
anorthite	-8.55
calcite	-5.64
gypse	~ -2

2.3.2. Les altérations liées à des concentrations de sels

Les sels transportés par l'eau sont également très néfastes. Leurs origines sont très diverses, ils peuvent provenir des processus chimiques liés à la pollution, ou être issus du sol dans le cas des remontées capillaires, ou être introduits par les mortiers et les enduits. Les sels présents dans les solutions qui saturent la pierre se cristallisent lors du séchage à la surface mais aussi dans les couches profondes de la pierre en fonction de leur degré de solubilité. Suivant le genre et la quantité de sels cristallisant à la surface de la pierre, il peut se former des taches, des efflorescences, des suintements, des dépôts plus ou moins mous (sulfate de sodium), durs et compacts (sulfate de carbonate de calcium), des films vitreux (sulfate de potassium), etc. La cristallisation des sels qui s'accompagne d'une augmentation du volume des cristaux dans les pores engendre une pression, souvent considérable, et suffisante pour provoquer par son action répétée, la détérioration de la pierre. En premier lieu on assistera à la dislocation des couches superficielles puis à la désintégration granulaire, à l'écaillage, à la fissuration donc à la décomposition de la pierre.

Les sels cristallisables causent généralement plus de dommages dans les pores et les microfissures de la pierre qu'à sa surface. L'intensité des détériorations est directement liée à la fréquence des cycles humidification/séchage, à la concentration des sels, à leur hygroscopicité et leur aptitude à la cristallisation

Les altérations liées à des concentrations de sels peuvent être classées en encroûtements, plaques ou désagréments sableuses en fonction de leur structure et de leur morphologie et des mécanismes qui les génèrent [7].

- **Les encroûtements**

Les encroûtements noirs ou croûtes noires, souvent épais et d'aspect scoriacé, observés sur les grès et les calcaires se développent également sur toutes les qualités de pierre. Suivant leur degré d'évolution (figure 14) montre un schéma de formation d'une croûte noir, les encroûtements se détache et la pierre sous-jacente est compacte et cohérente ou au contraire, ils adhèrent et incrustent le substrat pulvérulent et friable (figure 15 et 16). Ces encroûtements ne se développent que dans les parties humides abritées de lessivage où s'évaporent les solutions qui transitent à travers la roche. Les encroûtements qui se développent à l'abri de toute érosion peuvent recouvrir de grandes surfaces sur des épaisseurs dépassant un centimètre. Les encroûtements ont tendance à se détacher et la pierre sous-jacente à s'éroder, parfois sur plusieurs centimètres d'épaisseurs ; si les conditions d'expositions n'ont pas évolué, la nouvelle surface peut, à son tour être recouverte par un encroûtement [7].

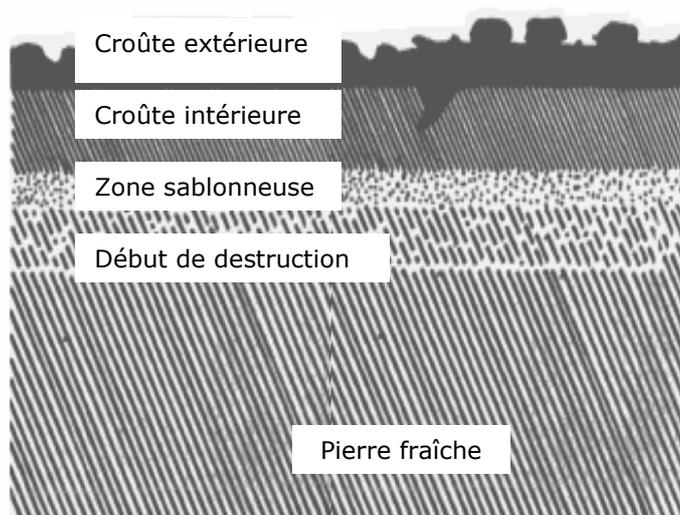


Figure 14 : Schéma de formation d'une croûte [7].

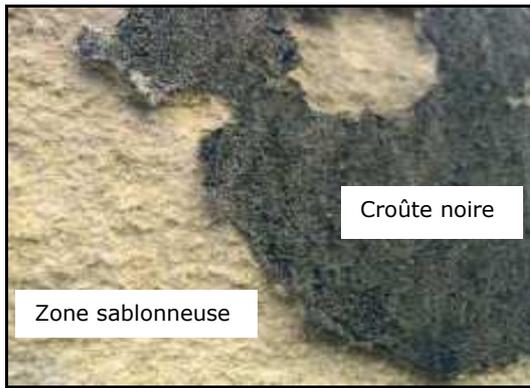


Figure 15: Croûte noire se détachant et laissant le calcaire pulvérulent [15]



Figure 16: Détachement de croûtes noires d'un mur

- **Les plaques**

Les plaques se développent sur des pierres soumises à des pluies fouettantes et a des cycles d'imbibition et de séchage, l'épaisseur de ces plaques varie de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Indépendantes du litage stratigraphique, les plaques qui moulent les surfaces externes se distinguent des éclatements dus au gel et des décollements résultant des dilatations hydriques car celles-ci peuvent toucher le mur entier. Habituellement, les plaques prennent naissance en bordure des joints par un décollement qui progresse vers la partie centrale jusqu'à la chute de la plaque (figure17 et 18). Lorsqu' une plaque se détache, la nouvelle surface qui se trouve en retrait par rapport au mur et ainsi protégée des ruissellements. Cette nouvelle géométrie de la surface ne favorise pas le développement d'une nouvelle plaque mais favorise la formation d'encroûtements et surtout de désagréations sableuses la figure19 montre le schéma d'une chronologie d'altération en plaques [7]



Figure17: Altérations en plaques. en pierre à Dellys.



Figure18 : Altération en plaques sur un mur [10].

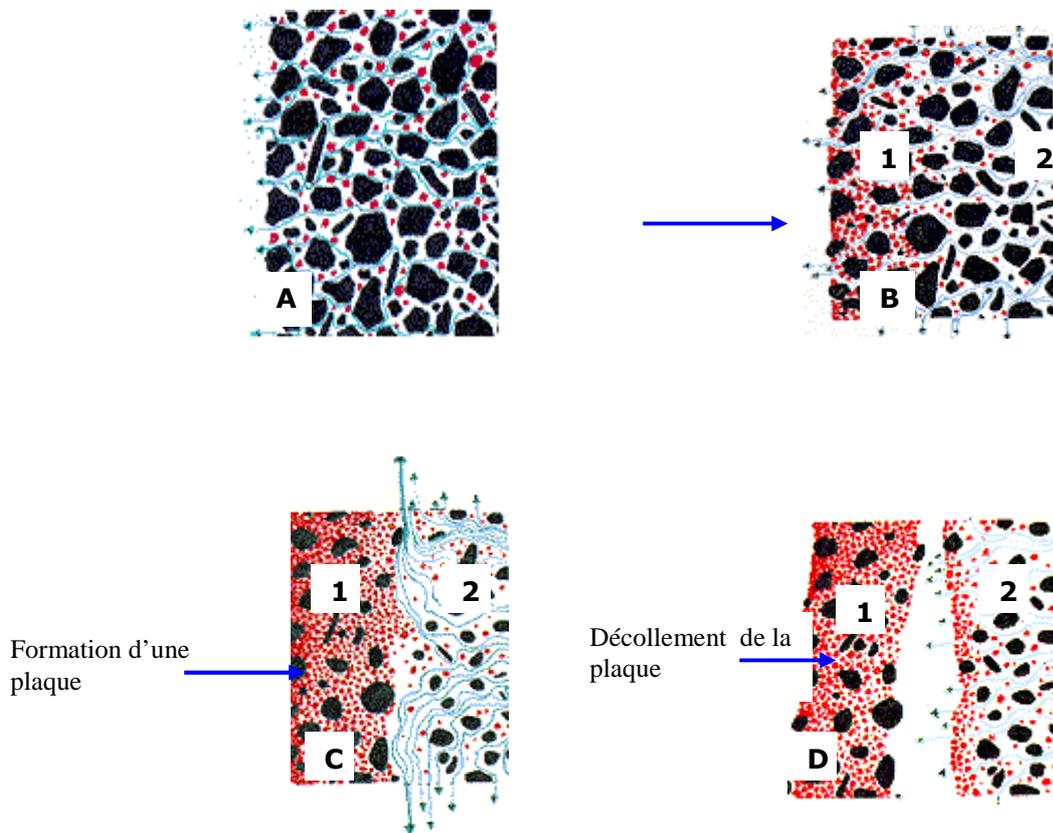


Figure 19: Schéma d'une chronologie d'altération en plaques [18].

- A) représente l'état initial de la circulation d'eau à travers la pierre ou l'eau suit un chemin direct.
- B) présence de deux zone la première et poreuse La deuxième moins poreuse du au transport de matière par l'eau .L'eau trouve des difficultés a traversé la deuxième zone il cherche un autre chemin pour se déplacer.
- C) la zone 2 devient imperméable l'eau ne peut plus circuler à travers on a une formation d'une plaque.
- D) sous l'action des forces de l'écoulement d'eau la plaque se décolle de son substrat.

- **Désagréations sableuses (alvéoles)**

Sur les pierres granuleuses humides mais non lessivées, le dessertissage des grains provoque une désagrégation sableuse qui est à l'origine d'une érosion rapide sous effet des lessivages (figure 20). Cette désagrégation peut affecter toute la surface de la pierre de façon homogène ou au contraire donner lieu à une érosion différentielle. Malgré des développements dans des conditions d'exposition identiques les désagréations sableuses sont le plus souvent indépendantes des encroûtements gypseux [7,15].



Figure 20: Désagrégation sableuse sur un mur en pierre calcaire [15]

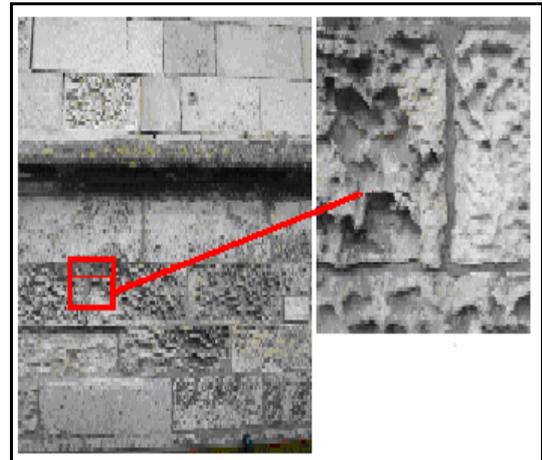


Figure 21 : Désagrégation sableuse par alvéolisation [10]

Sur les pierres homogènes, l'érosion évolue à la même vitesse sur toute la surface de la pierre ; progressivement, la face externe recule et se trouve en retrait de plusieurs centimètres par rapport à sa position initiale. Sur des pierres hétérogènes, à galets et à stratifications, une érosion différentielle se développe aboutissant à la formation des alvéoles (figure 21 et 22).



Figure 22: Désagrégation sableuse par alvéolisation sur un mur en pierre à Dellys.

- **Les efflorescences**

On rencontre une très grande diversité de sels, et parmi les plus fréquents, on trouve des sulfates Na_2SO_4 , K_2SO_4 , CaSO_4 ; des carbonates CaCO_3 , NaCO_3 ; des chlorures NaCl , KCl et des nitrates KNO_3 (salpêtre), NaNO_3 ... Les sels, provenant de la maçonnerie, du sol par des remontées capillaires (figure 23) ou bien être apportée par le vent si le matériau est situé à proximité de la mer (figure 24), cristallisent au niveau où se fait l'évaporation. Quand l'évaporation a lieu sur la surface, on a affaire à des efflorescences disgracieuses, mais le phénomène est plus grave quand la cristallisation a lieu à l'intérieur des pierres ces sels peuvent engendrer des pressions de cristallisations importantes (figure 25). La nature du réseau poreux de la pierre y est essentielle car ses propriétés déterminent si les sels cristallisent à la surface ou à l'intérieur du matériau. Quand la cristallisation se produit à l'intérieur de la pierre, elle y provoque des fissures importantes et plus ou moins grandes dimensions. Les efflorescences en surface sont moins dommageables (figure 26 et 27) [15,17].

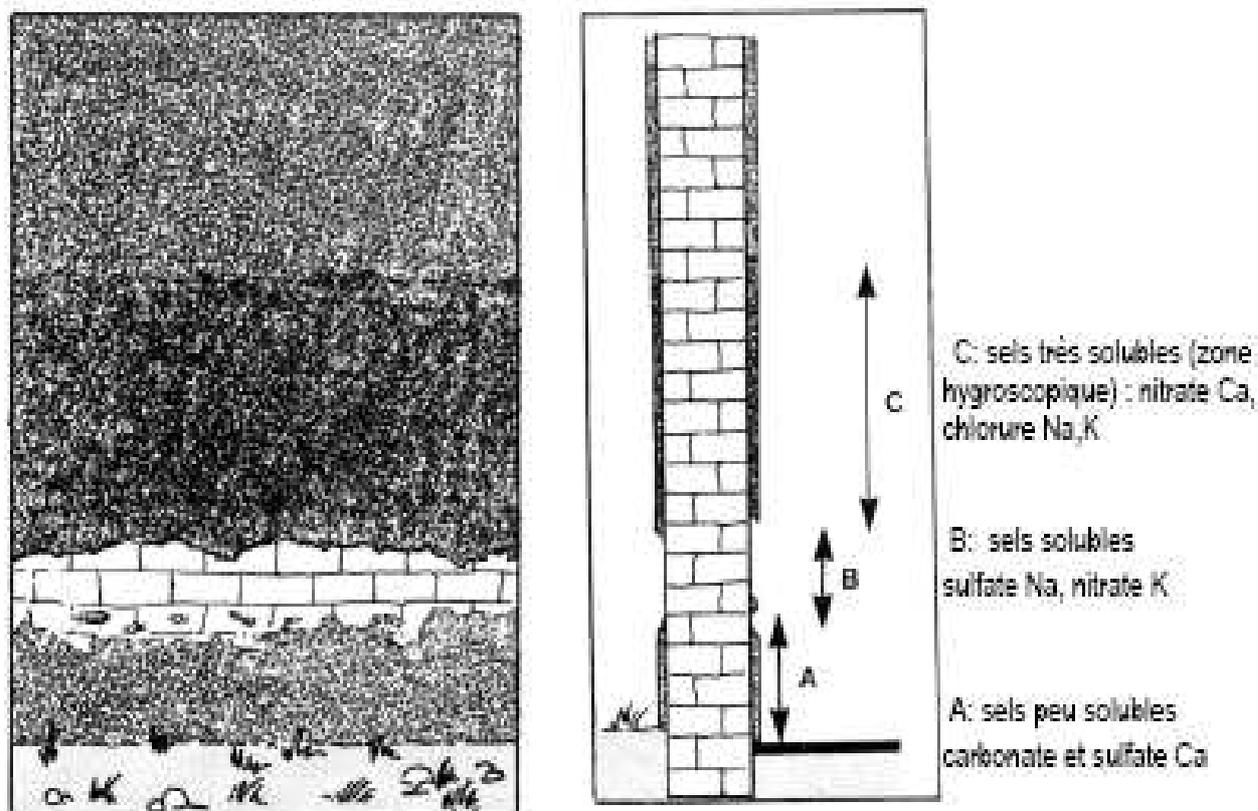


Figure 23 : Modèle de répartition des sels à l'échelle d'une maçonnerie soumise à des remontées capillaires d'après Arnould [10].

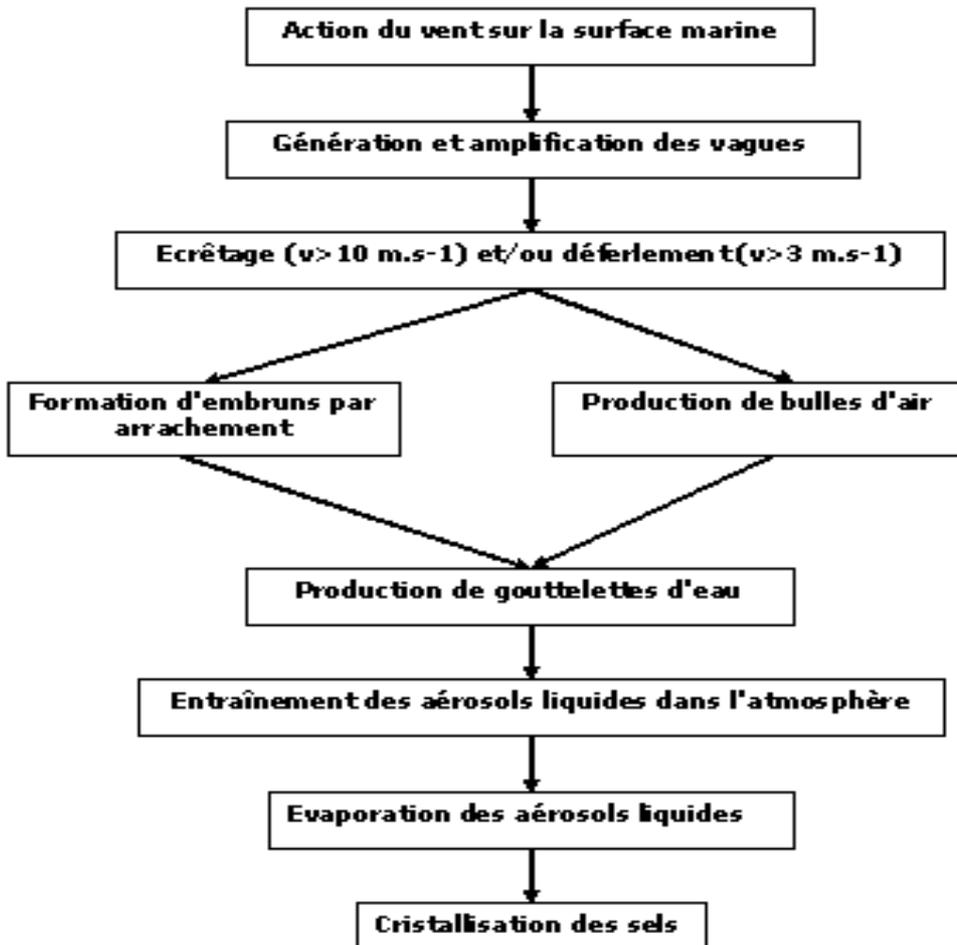


Figure 24 : Mode de transport de sels marin en solution sous l'action de vent d'après Resch [1].

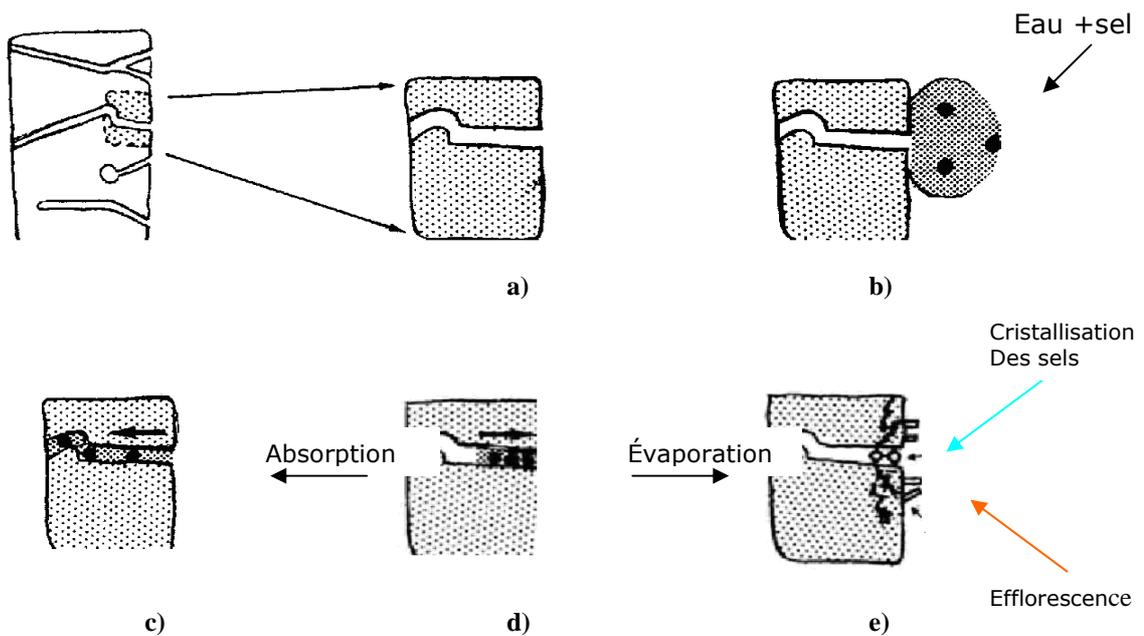


Figure 25: mécanisme d'action d'eau chargé de sels sur la pierre [16].

a- section d'un matériau poreux.

b- dépôt goutte d'eau salée sur le matériau.

c- diffusion d'eau salée à travers le réseau poreux du matériau par capillarité.

d- évaporation d'eau absorbée du matériau par phénomène de séchage.

e- les sels se cristallisent à la l'extérieure provoquant des efflorescences des fractures à la surface du matériau.

f- cristallisations des sel a l'intérieur du pore avec des contraintes mécaniques qui provoquent des fractures à l'intérieure du matériau



Figure 26: Efflorescence sous charpente capillaires mal isolée.

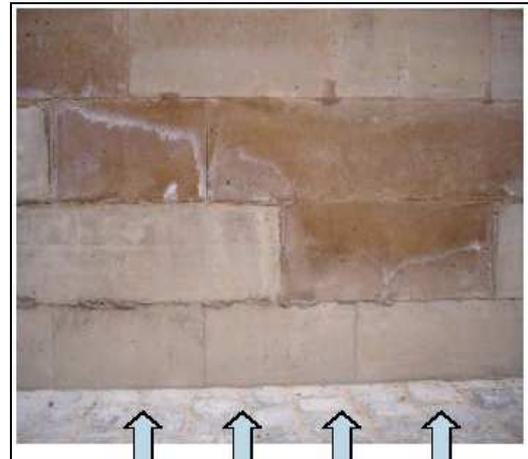


Figure 27: Remontées a partir du sol.

2.3.3. Polluants atmosphériques

Depuis quelques décennies; l'altération des monuments s'est considérablement accélérée prenant des formes inhabituelles; pathologiques; a mesure que se développait une pollution atmosphérique d'origine industrielle : il s'agit bien là d'une maladie en ce sens qu'elle est due à des causes inexistantes dans l'évolution naturelle et qu'elle est susceptible d'être traitée ou ralentie ; la pierre est ainsi apte à retrouver le cours de son évolution naturelle.

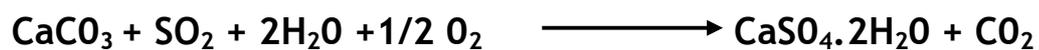
Parmi les transformations récentes de l'environnement atmosphérique; une acidification générale a été provoquée par l'augmentation des quantités de gaz dérivés du soufre et de l'azote associés aux micros particules minérales solides et

aux suies rejetées par les installations industrielles et les moteurs des véhicules. Or l'apport à l'état sec ou humide (pluies ou brouillards acides) de ces gaz et de particules étrangers aux substrats pierreux entraîne localisation de leur dégradations et réduction de résistance au temps [7].

Les gaz peuvent agir soit directement, soit en solution dans l'eau les principaux polluants atmosphériques qui peuvent être responsables de la dégradation de l'environnement des œuvres d'art dont les matériaux pierreux sont :

- Le dioxyde de soufre SO_2 .
- Les oxydes d'azote NO_x .
- Les hydrocarbures HC et les composés organiques volatils.
- L'ozone O_3 .

Le dioxyde du soufre est le polluant fondamental impliqué dans la détérioration de la pierre: il en résulte une formation du sulfate sur la pierre.



Le produit de la fin (gypse) est bien connu mais petit est au sujet des pas intermédiaires. Probablement, la plupart du processus important est l'oxydation hétérogène de dioxyde du soufre dans la phase aqueuse qui se produit dans l'atmosphère ou sur la surface. Selon l'environnement immédiat de la pierre, la couche du gypse est emportée et la surface s'éloigne, depuis que le gypse est plus soluble dans l'eau que calcite (2,4 g/L contre 0,014 g/L), ou il accumule et peut former des croûtes noires [21].

Le processus de détérioration de la pierre par la formation d'une croûte noire gypseuse sous l'action du SO_2 peut être modélisé de la façon suivante :

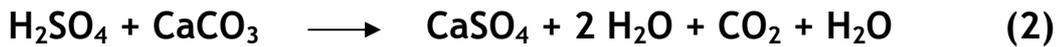
- **Première étape** (court terme)

Il s'agit dans cette étape d'une simple dissolution du carbonate de calcium. Elle comporte la dissolution normale de la calcite dans les eaux de pluie, provoquée par le CO_2 , l'accélération due à l'acidité des eaux de pluie résultant de la pollution atmosphérique, l'attaque par dépôt sec de polluants gazeux, principalement du SO_2 .



- **Seconde étape** (moyen terme).

Cette étape concerne la dissolution du carbonate de calcium en plus des retombées de particules granulaires moins solubles dans la matrice, comme par exemple pour les pierres calcaires ; l'élimination de petites quantités de la matrice de carbonate de calcium risque de relâcher un nombre considérable de grains de sable, provoquant ainsi une érosion surfacique plus importante.



- **Troisième étape** (long terme).

Dans les zones abritées où le sulfate de calcium n'est pas emporté par intermittence, il y a une accumulation irrégulière de sels. Ceci provoque alors la formation d'une croûte qui peut se poursuivre par une phase d'exfoliation. Même si la formation de ces croûtes est lente, l'exfoliation provoque des dommages très importants la figure 28 formations d'une croûte noire gypseuse sous l'action du polluant SO_2 [21].

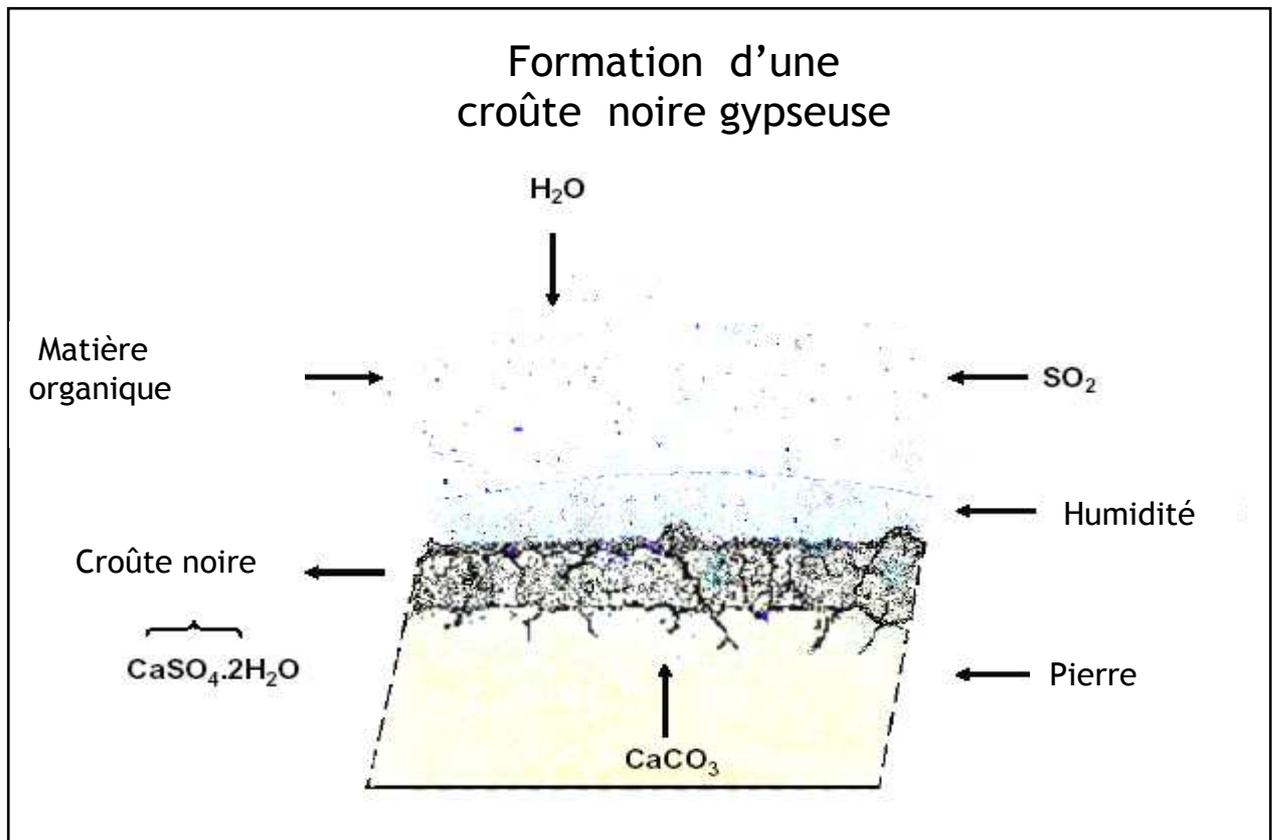


Figure 28: Formation d'une croûte noire gypseuse sous l'action du polluant SO_2 [2

2.4. LES ALTERATIONS BIOLOGIQUES DE LA PIERRE

Si la pollution chimique et les phénomènes physiques et mécanique sont les principaux facteurs d'altération de la pierre ; l'activité microbienne peut également être à l'origine de certains dégâts que l'on désigne par le terme général de **biodétériorations**.

Parmi les organismes qui peuvent se développer sur un substrat rocheux les bactéries les algues, les mousses, les lichens et les Végétaux supérieurs qui par leur fonction ; leur métabolites ou leur manifestations Visibles sont susceptibles d'induire des altérations physiques, chimique ou des « maladies De la pierre » [7].

2.4.1. Les bactéries

Les bactéries jouent un rôle essentiel dans les transformations des matières organiques et minérales pour des besoins de vie (besoin d'un support, de la matière minérale et de l'énergie). On connaît les cycles de l'azote et du carbone. Le cycle du soufre revêt une importance particulière dans l'évolution des constructions en pierre. A la base des murs se développent des bactéries capables de réduire les sulfates en sulfures, thiosulfate et soufre minéral. D'autre part, de nombreuses bactéries dégradent les composés organiques soufrés pour libérer de l'hydrogène et d'autres oxydent les sulfures et le soufre pour donner l'ion sulfate (SO_4)²⁻ouvrant la voie à la formation d'acide sulfurique et bouclent ainsi le cycle du soufre. Le gaz carbonique pour utiliser le carbone nécessaire à leur métabolisme. Ils se trouvent donc préférentiellement vers la surface des pierres. Les nitrobactéries forment une chaîne semblable avec l'azote. Toutes ces transformations ont des conséquences importantes sur la pierre qui abrite les bactéries qui peuvent conduire :

- A borner à argile et particules des cristaux et donc être plus persistant sur les surfaces de la pierre et espaces des pores;
- A solubiliser le CaCO_3 à travers la parution de produits métaboliques acides et/ou à travers Processus respiratoire et parution de CO_2 (activité acide faible);
- Oxyder le composé métallique Fe même, Mn et rôle principal à précipitation d'orange pour noircir pose en couches ou taches;
- Précipiter passivement ou activement carbonate, oxalate et autres minéraux et donc contribuer aux formations de la patine.

- Accroître la formation du gypse [4, 11].

2.4.2. Les algues

Les espèces les plus répandues sur les édifices sont les cyanophycées (algues bleues) et les chlorophycées (algues vertes).

Les cyanophycées, organismes procaryotes pigmentés en bleu-vert dans la masse se développent dans des milieux humides, peu ou pas éclairés, et provoquent sur la pierre la formation de dépôts noirs, visqueux, le plus souvent à l'intérieur des édifices.

Les chlorophycées, organismes eucaryotes, renferment des noyaux et plastes dont certains, riches en chlorophylle permettent la photo-synthèse. Elles se développent dans les zones éclairées et humides mais à l'abri du soleil direct. Elles sont responsables de nombreuses salissures vertes « verdissement » observés sur les statues, les murs des édifices et les grottes ornées ouvertes au public [7].

La figure 29 montre le schéma du développement de salissures sur des murs propres dans un milieu urbain (milieu pollué avec la présence des dépôts de poussières) et dans un autre milieu peu pollué.

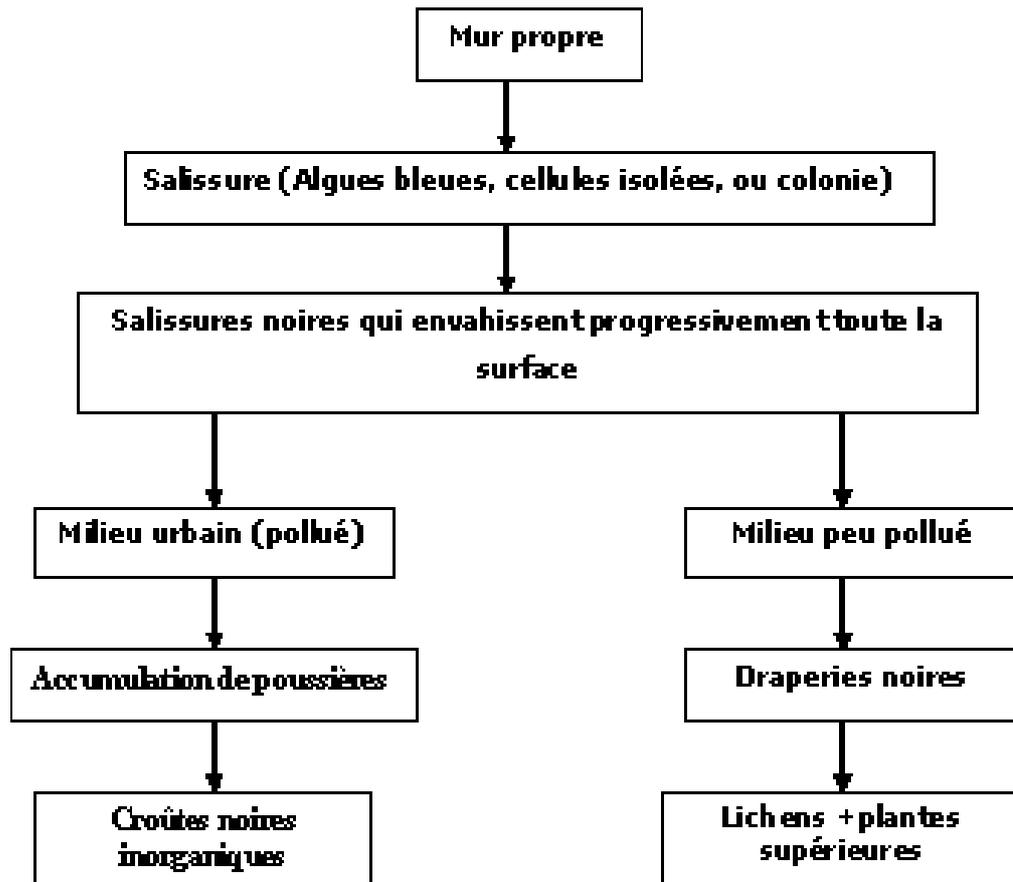


Figure 29 : Schéma de développement de salissures des murs [8].

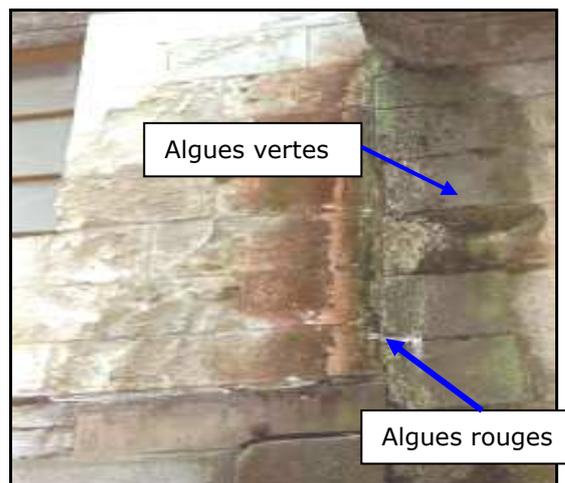


Figure 30 : Développement d'algues vertes et rouges sur un mur calcaire exposé à un écoulement d'eau [15].

2.4.3.Lichens

Les lichens sont des organismes pionniers pour coloniser des surfaces de pierre. Les effets de lichens sont mécaniques et produit chimique. Les lichens colonisent très fréquemment les bâtiments en pierre (figure 26). On distingue les macro -lichens et les micro-lichens incrustants mais également des espèces qui restent confinées en surface, et des espèces qui se développent à l'intérieur des pierres.

La dégradation physique de la pierre par les lichens est la pénétration (des racines) des paquets de filaments qui permettent au lichen de s'accrocher a son substrat la profondeur de pénétration varie de 300µm à 16mm selon l'espèce et la nature de la pierre (voir figure 31) : plus celle-ci est tendre, plus les racines peuvent s'enfoncer. La pénétration des racines dans une pierre cristalline peut ainsi causer une désintégration mécanique [7].



Figure 31 : Développement de mousses et de lichens à la base d'un mur en pierre calcaire [15].

2.4.4.Les végétaux supérieurs

Les végétaux supérieurs ont une action moins dégradante que les champignons, les mousses et les lichens.

Les végétaux supérieurs s'installent généralement lorsque par défaut d'entretien on a laissé se développer des dépôts poussiéreux, des algues, des mousses et des sur lesquelles les pollens des végétaux supérieurs vont trouver un milieu favorable (figure 32 et 33). Par exemple des véritable arbres : les figuiers en milieu méditerranéen.

Les végétaux possèdent des racines qui peuvent faire éclater les roches ou les joints. La pression développée par une racine peut atteindre des valeurs de 10 à 15 kg/cm². Ces valeurs se retrouvent aussi pour les plus petites racines et radicelles qui sont capables de turgescence [8].

De même les plantes grimpantes sont à éviter : non seulement elles concourent par leurs racines adventives à la dégradation physique mais apportent des éléments chimiques agressifs et par ailleurs favorisent l'humidification du milieu [7].



Figure 32 : Colonisation par des plantes à fleurs [18].



Figure 33 : Développement d'herbes et d'arbustes entre les joints de pierre [15].

2.5. AUTRES FORMES DE DEGRADATION

- La compatibilité pierre mortier

Sur la plupart des anciens bâtiments en pierre de taille, on remarque que sur les murs assemblés avec des mortiers à la chaux, peu ou pas d'altération se développe sur les pierres bordant les joints. Les chaux utilisées étaient, sauf exception, des chaux aériennes ou à faible indice d'hydraulicité. Ces mortiers à la chaux, dépourvus de sels nocifs et très perméables, ne créent pas d'obstacle à la continuité hydrique entre les pierres et donc, ne favorisent pas la rétention de l'eau. A l'opposer, les mortiers modernes, à base de ciment silicatés ou de chaux fortement hydrauliques, forment des zones riches en sels et moins perméables qui favorisent l'accumulation d'eau et de sels dissous dans les pierres, qui conduit un creusement rapide avec le départ d'une plaque ou en désagrégation sableuse. Une illustration du phénomène est présentée dans la figure 34 où des blocs pierre sont liés avec un mortier à base de ciment [8].

La pierre a un aspect pulvérulent en surface, et elle s'est creusée sur plusieurs centimètres laissant les joints de mortier en relief (Figure 35).

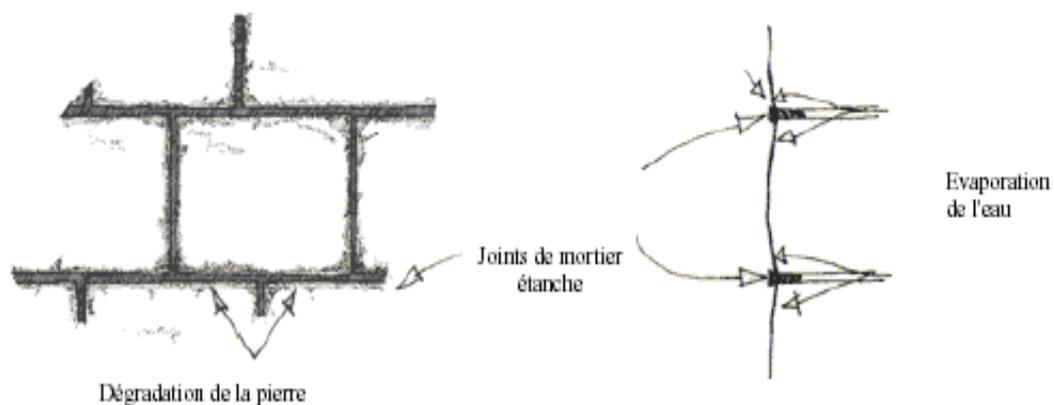


Figure 34: Schéma d'altération des pierres liées avec un mortier étanche.

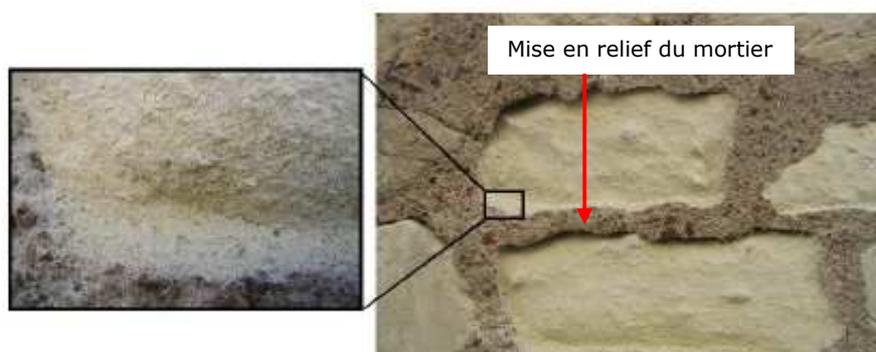


Figure 35 : Incompatibilité entre une pierre calcaire et un mortier à base de ciment provoquant une altération de la pierre en désagrégation sableuse [15]

- **La compatibilité pierre-pierre**

Sur un monument, la juxtaposition de pierres d'aspect similaire mais de nature pétro-physique différente peut accélérer la dégradation de l'une d'elles. Une pierre laissant faiblement circuler les fluides, juxtaposée à une pierre favorisant leur passage, va empêcher la circulation homogène des fluides. Cette dernière sera beaucoup moins drainée que sa voisine et accumulera les sels dissous favorisant sa dégradation. Une illustration du phénomène est présentée dans la (figure 36) où des blocs de calcaires tendres sont juxtaposés à un calcaire dur. Le calcaire tendre se désagrège très fortement alors que l'autre type de pierre ne présente pas de faciès d'altération [15].

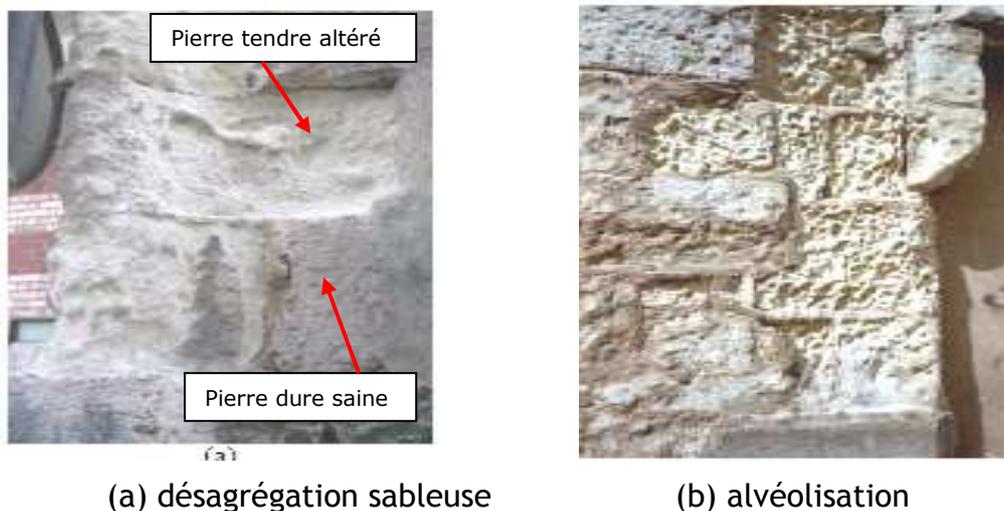


Figure 36: incompatibilité entre une pierre calcaire tendre poreuse et une pierre plus dure et compacte].

- **Action des charges Mécaniques :**

Sous l'action des sollicitations trop importantes pour l'actualité de pierre utilisée, les contraintes peuvent provoquer la rupture de la pierre.

Parmi les factures qui influent le plus sur la résistance mécanique des murs en pierre, il faut noter surtout les 03 défauts suivants :

- Le pierre posées en délit : certaines pierre prendre qualité beaucoup plus faible lorsqu'elles sont sollicitées parallèlement au lit de stratification naturelle ;
- Le mauvais remplissage des joints : lorsque les joints sont partiellement bourrés, la répartition des tension n'est pas uniforme, des concentrations peuvent entraîner la rupture des chocs qui se cassent par poinçonnement ;

- La teneur en eau dans les pierres tendres : les pierres poreuses saturées d'eau fois plus faible que celle d'une pierre sèche [8].

La figure 37 ci-dessus montre la courbes contrainte-déformation lors de l'essai en compression uniaxiale pour différents états hydriques pour un calcaire, la résistance mécanique est importante à l'état sec et plus faible à l'état saturé mais sa diminution est très forte dès qu'il y a présence d'eau et donc dès les très faibles degrés de saturation. Et ensuite, passé un certain degré de saturation, la résistance mécanique n'évolue plus quand la proportion d'eau augmente et reste à sa plus faible valeur [15].

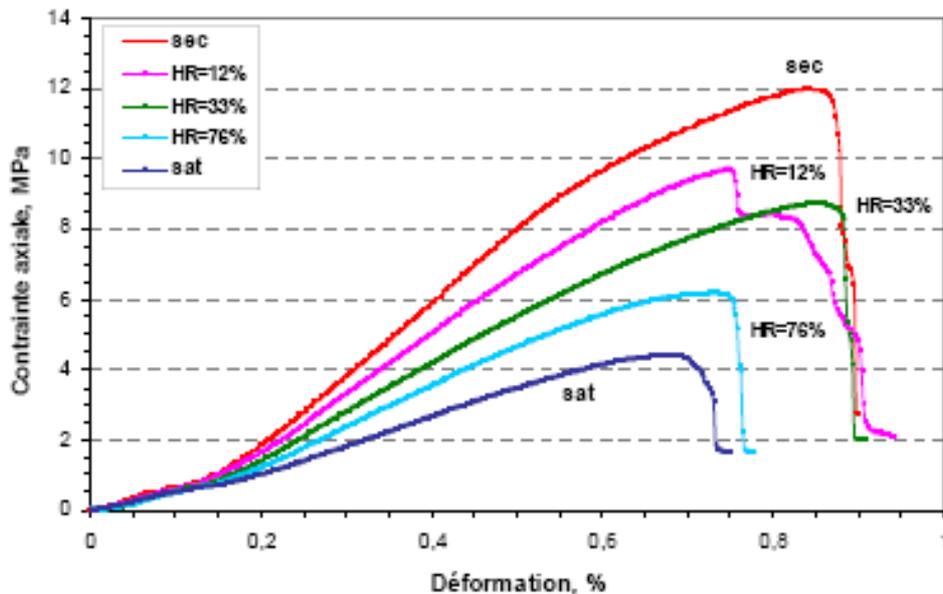


Figure 37 : Courbe contrainte-déformation lors de l'essai en compression uniaxiale pour différents états hydriques pour un calcaire [15].

- **Hétérogénéité du matériau (différence de structure)**

Les différences de structures peuvent être marquées par les délits, qui sont des joints naturels séparant deux formations sédimentaires consécutives.

Ces délits plus ou moins apparents, sont constitués par une mince couche d'argile ou par une couche de bousin (matière terreuse) de plusieurs centimètres d'épaisseur.

Les bancs de pierre sont formés de dépôts naturels de matières calcaires qui étaient tenues en suspension dans les eaux des mers, des lacunes ou par des dépôts de précipitation [7].

- ***Couches tendres (lit d'argile)***

Les roches sédimentaires peuvent contenir des lits de structure et de composition déférente. Les lits plus tendres sont érodés plus rapidement par les intempéries. En parement, si la pierre est posée convenablement sur son lit, cette forme de détérioration n'a que peu d'importance pour la statique de la construction tandis qu'employée en saillie, les altérations peuvent en compromettre la stabilité [19].

- ***Fils***

La présence de fissures minuscules dans les pierres peut présenter des sérieux inconvénients. Quelquefois des fils sont ressoudés par des dépôts de calcite provenant des eaux d'infiltration. Dans un bâtiment très mouluré, la présence des fils est une source de danger [8].

- ***Utilisation d'un matériau de qualité non appropriée à sa fonction dans l'ouvrage***

Il est préférable de choisir les matériaux en se référant à des exemples montrant leur durabilité dans la région ou l'on veut construire plutôt que de restaurer avec une qualité de pierre inapte à résister aux intempéries dans certaines conditions d'exposition [8].

- ***Les matériaux instables***

Certains matériaux se montrent totalement néfastes à l'usage car ils évoluent. C'est l'exemple du fer qui augmente considérablement de volume en s'oxydant et peut faire éclater la pierre. Ainsi, même un simple clou se révèle dangereux comme le montre la Figure26. L'interposition de plomb a été pendant longtemps une solution satisfaisante [18]

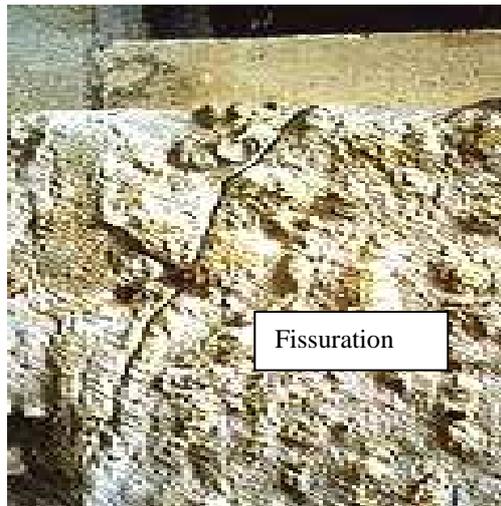


Figure 38 : Eclatement de la pierre par oxydation d'une pièce en fer forgé [18]

- ***Les animaux***

Les animaux exercent différentes actions nocives sur la pierre : en ville, sont particulièrement actifs, les oiseaux et les petits mammifères. Les oiseaux et surtout les pigeons agissent à la fois par la désagrégation mécanique par la construction des nids, les affouillements mais aussi par le dépôt des fientes, d'éjections (guano) qui contient près de 2 % d'acide phosphorique qui réagit chimiquement avec les constituants de la pierre qui conduit à des modifications donc à des altérations dans cette dernière [8].

- ***Action de l'homme***

L'homme va avoir sa part de dégradation non seulement par effet indirect (combustion, utilisation des véhicules, activités industrielles) mais aussi par la fréquentation abusive des monuments (arasions des pierres, usures, déstabilisation...) et toutes les dégradations volontaires ou involontaires de l'homme : incendie, guerre, vandalisme, déprédations, mauvaises restaurations [8].

CHAPITRE 3 :
MOYENS DE PRESERVATION DE PIERRES DE
TAILLE

3.1. PRESERVATION CONTRE L'EAU ET L'HUMIDITE

3.1.1. Introduction

La détérioration de la pierre à des causes diverses. La qualité intrinsèque de la roche, son utilisation plus ou moins judicieuse, les facteurs climatiques, la pollution, détermine directement la durabilité du matériau. A la base de presque toutes les altérations, il y a un élément commun : L'EAU. L'eau est l'ennemie, elle constitue par excellence l'agent agressif ou le catalyseur de l'agression, par son impact sur les pierres, de son cheminement, de sa composition et de sa capacité à dissoudre, déplacer ou précipiter les minéraux, ramener des produits, que dépendent la plupart des modifications et des dégradations physique, chimique et biologique.

Les causes de l'humidification sont diverses et complexes, chaque cas étant une superposition de causes. Aussi les moyens de lutte sont-ils aussi divers et eux-mêmes complexes. On peut dire, comme dans tout autre problème technique, que chaque groupe de cas a ses solutions, et que jusqu'à présent, il n'existe pas une méthode de combat « bonne à tout » [7].

Les principales formes sous lesquelles l'humidité peut paraître dans les édifices anciennes, sont :

- L'ascension capillaire de l'humidité du terrain.
- Les défauts constructifs de certains éléments et des détails d'architecture, du point de vue de la conception originelle: corniches, balcons, terrasses, écoulements...
- La dégradation de certains éléments d'évacuation des eaux ou des installations;
- Pénétration d'eau de pluie à travers le réseau poreux des pierres d'un mur.

On peut classer les méthodes de lutte contre l'action destructrice de l'humidité comme suit :

- Méthodes de lutte contre l'ascension capillaire.
- Méthodes de lutte contre les infiltrations de pluie.

3.1.2. Méthodes de lutte contre l'ascension capillaire

- **Le drainage**

Pour drainer les eaux du sol afin de les éloigner des fondations on pose au fond des drains en poterie ou en mortier creux avec une pente de 1° au moins (voir figure 39) s'écoulant vers un puisard ou un fossé. Le drainage assainit la maçonnerie, réduit les infiltrations latérales mais n'élimine pas complètement les remontées capillaires [19].

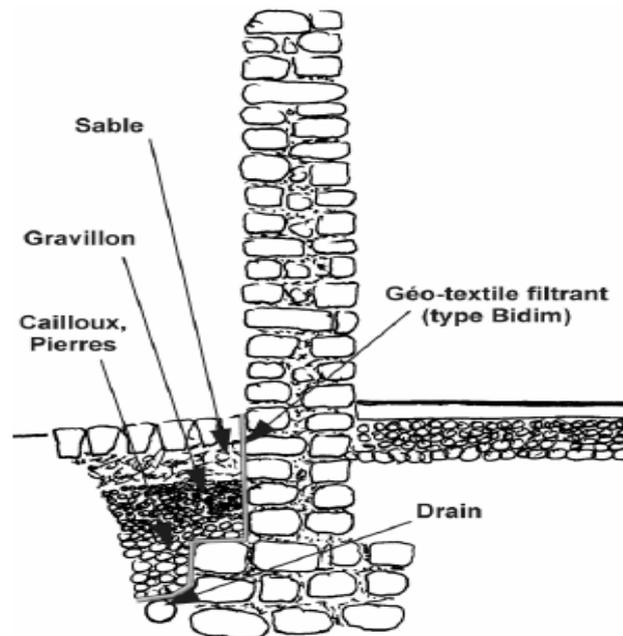


Figure 39 : Modèle de drainage d'un mur en pierres [19].

- **Plaque étanche horizontales :**

Il s'agit de placer, par fonçage à travers le mur, une plaque métallique ou en plastique étanche à l'eau afin d'empêcher la remontée de celle-ci dans le mur (figure 40). On peut également procéder à un déjointoiement horizontal sur toute la largeur du mur figure(41), par morceaux ; on interpose ensuite une membrane étanche à l'eau dans l'espace ainsi préparé et on rejointoie soigneusement. C'est un procédé radical mais structurellement, délicat à réaliser [7].

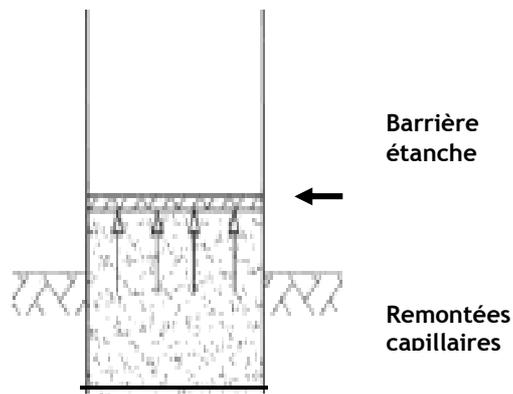


Figure 40: Application de barrière étanche à travers un mur sujet à des remontées capillaires

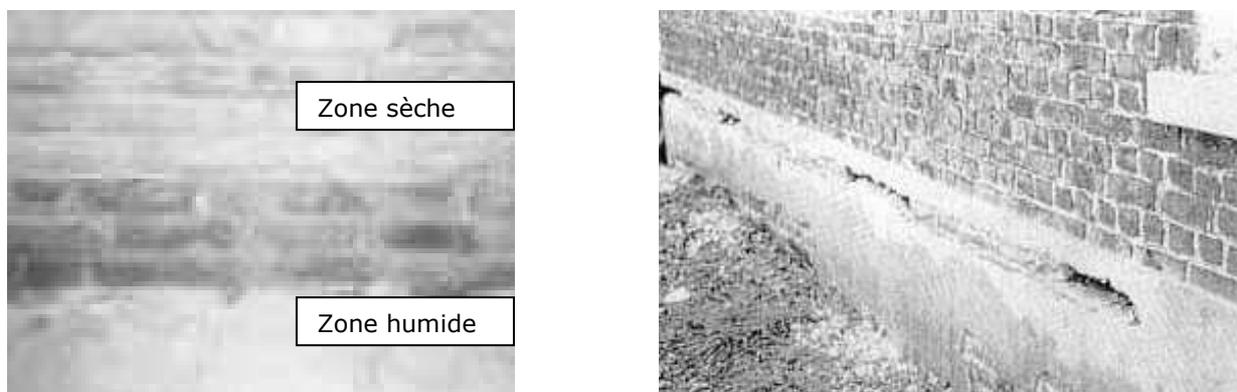


Figure 41: Pose d'une barrière imperméable [17]

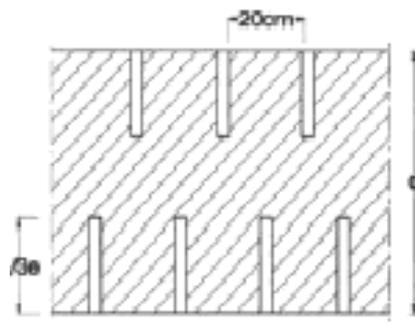
- ***Aération***

Il convient de ménager une lame d'air ventilé entre le terrain et la fondation à l'aide d'éléments creux (briques creuses Agglomérés) éventuellement cette lame d'air peut être drainée à la partie inférieure.

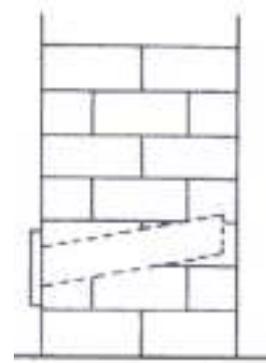
- ***siphons atmosphériques (siphon de knappen)***

Ce procédé consiste à assécher le mur en augmentant sa surface d'évaporation. Ce dispositif utilise des siphons mis en place à des espaces réguliers et inclinés vers l'extérieur du mur (figure 42 et 43). L'eau du mur, aspirée par le siphon par capillarité, s'évapore. Cette évaporation à l'intérieur du siphon entraîne un refroidissement de l'air qui s'échappe vers le bas du siphon, c'est-à-dire vers l'extérieur. Cet air est remplacé par un air sec extérieur qui se charge d'humidité. Ce phénomène crée une circulation d'air naturelle à l'intérieur du siphon.

Ce procédé est peu efficace, notamment du fait que son fonctionnement varie en fonction des saisons et de l'orientation de la façade [5,24].



Coupe horizontale du mur



Coupe verticale du mur

Figure 42: Assèchement d'un mur par des siphons atmosphériques [16]



Figure 43 : Siphons atmosphériques placer en bas de mur [17].

- ***Injection de produits imperméabilisants :***

Une autre solution consiste à injecter, par gravité ou sous faible pression, des produits imperméabilisants à la base des murs, tels que gels acrylamides, résines époxydes, silicones, méthylsiliconates, stéarates d'aluminium, etc.... .Ces produits se diffusent dans les maçonneries par capillarité, et polymérisent en formant un écran imperméable à l'eau (Figure 44 ,45) [5,24].

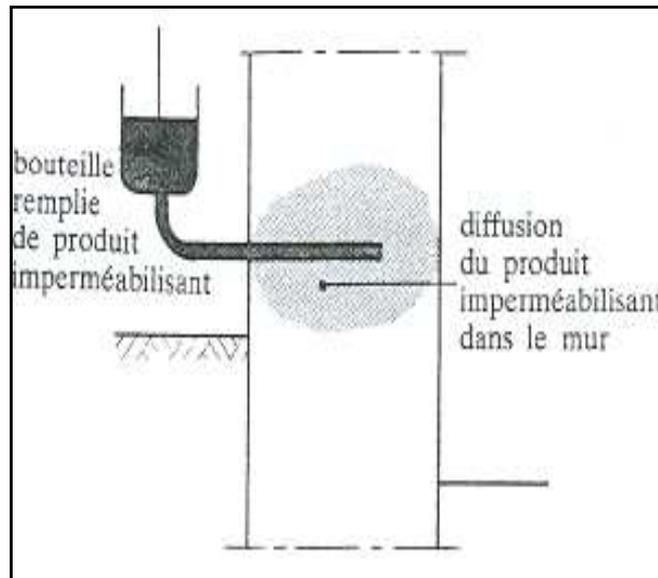


Figure 44: Application de produit d'imperméabilisation sur un mur



Figure 45: Injection d'un produit hydrofuge.

- ***Electro-osmose***

Il s'agit d'une méthode basée sur l'utilisation des tensions électriques pour faire migrer l'eau en sens inverse de la remontée capillaire, une différence de potentiel est créée entre le mur humide et le sol, le mur étant le pôle + et le sol, le pôle -. Pour ce faire, on crée une pile électrique en utilisant des métaux différents ou plus récemment des fibres de carbone disposés de la façon suivante : dans le sol, des blocs de magnésium reliés par un fil de cuivre formant cathode et, dans le mur humide, des fils de cuivre, espacés de 30 à 50 cm, reliés eux aussi par un fil de cuivre, formant anode (figure 46). La différence de potentiel créée est de l'ordre de 1 volt et serait suffisante pour faire cheminer l'eau vers la base du mur [5,24].

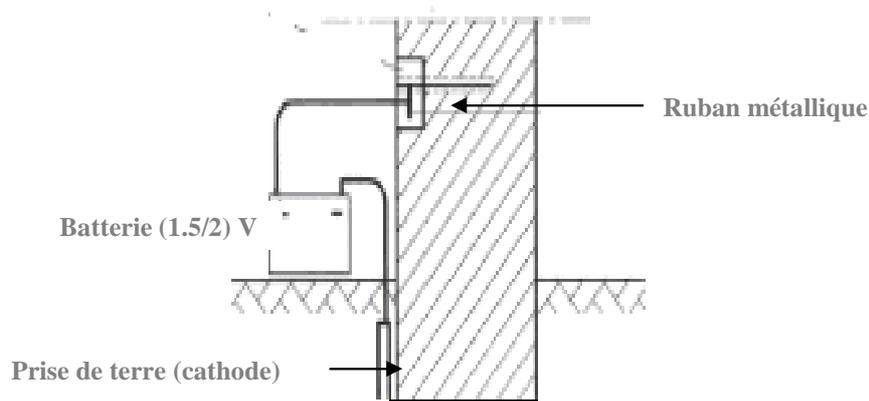


Figure 46 : Electro-osmose activée par interposition d'une source de courant Entre la maçonnerie et le terrain [16]

3.1.3. Méthodes de lutte contre les infiltrations de pluie

La pluie frappe contre les parois des murs et pénètre dans ceux-ci, les murs exposés aux vents dominants étant les plus vulnérables. Cette action est aggravée en bord de mer, car la pluie chargée d'embruns dépose du sel sur les maçonneries ; celles-ci deviennent alors hydrophiles et retiennent l'eau, les murs sont alors constamment humides.

Selon le résultat du diagnostic, les techniques à utiliser seront différentes, adaptées à chaque cas. Parmi lesquelles :

- **Hydrofugés de surface**

Ils doivent en générales être appliqués sur un support sec, la réussite de cette protection réside surtout dans le soin apporté à l'application. Les produits hydrofuges ont la propriété de réduire l'absorption capillaire de la surface des matériaux, tout en permettant les échanges de vapeur d'eau.

De plus, ils facilitent le nettoyage ultérieur et ralentissent les effets d'encrassement. Les principaux produits hydrofuges sont :

- les siliconates ;
- les silicones ;
- les organo-métalliques.

L'application de produits hydrofuges sur la pierre est parfois fortement déconseillée et à n'utiliser qu'avec précaution. Sur les pierres à pores fins, il peut se produire des accumulations de sels derrière la zone hydrofugée, qui peut

provoquer des cloquages. Dans tous les cas, le support doit être nettoyé et les parties friables enlevées [19].

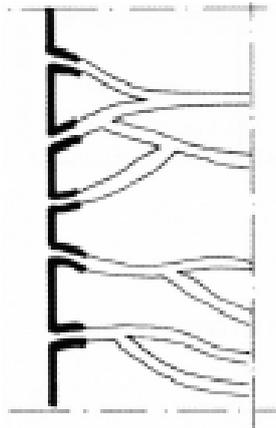


Figure 47 : Application d'un produit hydrofuge laissant respirer les pores

- **Revêtements sur la façade enduits**

La surface perméable à l'eau de pluie doit être préparée : par repiquage et par dégarnissage des jointes, ensuite la surface est brossée puis mouillée abondamment l'enduit est ensuite appliqué en plusieurs couches : 1^{ère} couche d'accrochage, 2^{ème} couche corps de l'enduit et la 3^{ème} couche : couche de finition (figure 48)

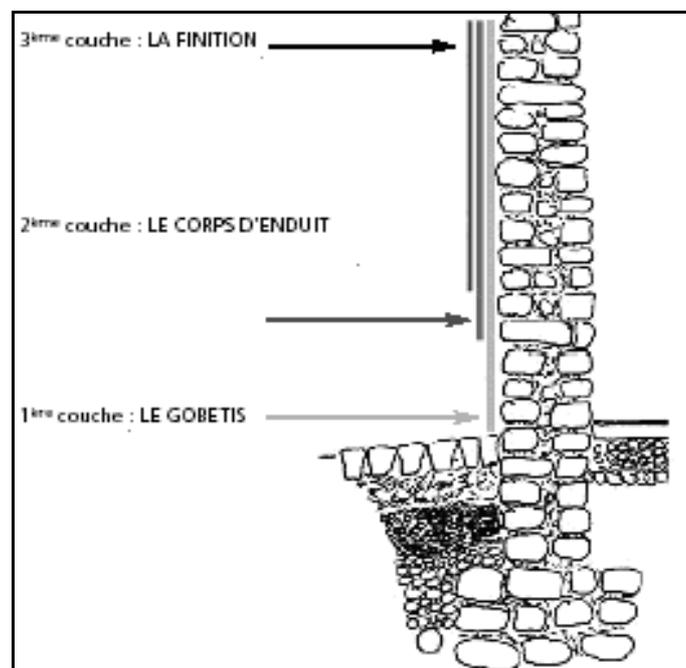


Figure 48 : Revêtements enduits contre l'infiltration de pluie [19]

- **Peintures**

Les peintures peuvent imperméabiliser pendant une certaine période les murs traversés par la pluie. L'efficacité dépend beaucoup de l'état du support (fissures, effritements, etc...). Les résultats sont obtenus avec les peintures à base des produits suivants :

Silicates, Caoutchouc isomérisé ou chloré, Acryliques, Phénoliques et Bitumineux [19].

- **Bardages**

Dans certains cas, l'état du support ne permet pas d'autre solution que le bardage, qui consiste à rapporter des éléments (plaques) devant les parements exposés aux intempéries.

Ils sont constitués par : des ardoises, de l'amiante-ciment, de l'aluminium, du zinc, du cuivre, de l'acier inoxydable ou galvanisé [19].

3.2. LE NETTOYAGE

Le nettoyage est une opération qui permet l'enlèvement des dépôts de matière sur la surface de pierre provenant de l'intérieur ou de l'extérieur : poussières, salissures, efflorescences, encroûtements, taches de rouilles.

Il existe de nombreux procédés de nettoyage de pierres, mais ils ne sont pas toujours applicables sur tous les types de pierres, avant de choisir le procédé il faut tenir compte de la nature du produit de nettoyage et son impacte sur la pierre, la nature de la pierre à nettoyer (résistance mécanique à l'abrasion, porosité, absorption....) et l'état de surface de la pierre, pierre légèrement ou très altérée [7].

- **Projection de granulats à sec**

Ce procédé consiste à projeter à sec et sous pression d'air des particules de granulométrie déterminée sur le matériau de façade, au moyen d'une lance actionnée manuellement.

Les granulats utilisés sont des granulats de quartz (oxyde de silicium SiO_2), des granulats d'autres minéraux (tous les minéraux autres que ceux à base de quartz; le minéral le plus utilisé à l'heure actuelle est connu sous le nom d'olivine et est obtenu en broyant des roches d'orthosilicate de fer et de magnésium) et des granulats non minéraux (grenailles métalliques, sciures de bois, poudres d'écorces, noyaux broyés...

L'abrasion de la surface du matériau par un sable est liée entre autres à la nature du matériau à nettoyer, à la granulométrie, à la masse volumique, à la forme et à l'élasticité du minéral employé, à la pression d'air à la sortie de la lance et à la distance de travail entre l'extrémité de la lance et la surface à nettoyer ; De ces facteurs dépend donc le résultat qui peut aller d'un léger dépoli à une attaque de plus de 2 à 3 mm de profondeur [20].

- **Grésage hydropneumatique**

Cette méthode consiste à projeter en même temps au moyen de deux conduits distincts de l'eau et un minéral de granulométrie déterminée. Les

minéraux sont les mêmes que ceux employés pour la méthode de projection de granulats à sec.

Avant l'emploi des matières abrasives, il est utile de réaliser une pulvérisation d'eau de manière à imbiber l'encrassement.

Le grésage hydropneumatique permet l'élimination rapide des encrassements quelle que soit leur intensité et ne présente pas pour l'environnement d'inconvénients majeurs. Pour ces raisons, cette méthode est couramment utilisée dans la mesure où l'altération du matériau ne constitue pas un critère trop absolu.

Comme le système de projection de granulats à sec, le système par grésage hydropneumatique est déconseillé pour les surfaces lisses ou polies.

- **Pulvérisation d'eau à basse pression**

Le ruissellement d'eau pur et simple n'est pratiquement plus employé étant donné la longue durée de l'opération et les dégâts dus à une grande humidification des murs qu'elle entraîne.

Actuellement, cette méthode est remplacée par la pulvérisation d'eau à basse pression. Celle-ci est utilisée pour ramollir les encrassements gypseux et consiste à pulvériser au moyen de rampes munies de gicleurs un minimum d'eau sur la surface du matériau, sans ruissellement proprement dit, ce qui dans un premier temps est inutile. La pulvérisation est de courte durée et répétée plusieurs fois si nécessaire. L'encrassement est ainsi ramolli par solubilisation partielle et son évacuation est ensuite effectuée au moyen d'un jet d'eau sous pression. L'efficacité de la méthode est nettement accentuée si on procède à un traitement manuel des surfaces à l'aide d'une brosse en nylon.

Ce procédé convient particulièrement pour le nettoyage des matériaux calcaires et des matériaux à ciment calcaire; il ne permet toutefois pas d'éliminer des encrassements fortement incrustés, notamment dans les matériaux siliceux [19,20].

- **Vapeur saturée humide**

Cette technique consiste en la projection sous pression d'une vapeur saturée humide. Cette méthode convient très bien si les salissures ne sont pas trop incrustées et elle permet aux matériaux de conserver leur surface.

Le mécanisme d'élimination du salissement peut se décomposer en trois phases :

- Ramollissement de la crasse par l'eau condensée s'écoulant sur la façade;

- Décollement de la crasse par l'action mécanique de la vapeur, favorisée par la température élevée;
- Elimination de la crasse par le ruissellement d'eau qui résulte du refroidissement de la vapeur.

Il est primordial que la vapeur à la sortie de la lance soit saturée et humide, de manière à obtenir au contact de la surface froide un ruissellement d'eau susceptible d'entraîner les crasses décollées par le jet de vapeur et d'assurer indirectement un ruissellement préalable des surfaces inférieures [19,20]

- **Traitement chimique et/ou tensio-actif**

L'emploi de produits chimiques peut entraîner sur les matériaux traités l'apparition d'efflorescences résultant de la migration de sels solubles engendrés par une réaction du produit dans le matériau ou par le fait du produit de nettoyage lui-même. Il faut donc exclure tous les produits chimiques susceptibles de provoquer l'apparition d'efflorescences. En effet, la grande difficulté, lors de remploi de produits chimiques, n'est pas d'enlever la saleté mais d'éviter la pénétration du produit dans le matériau.

D'une manière générale, l'emploi de l'acide chlorhydrique, des sels de sodium et de potassium, des détergents anioniques (sels sodiques) doit être interdit sur les matériaux poreux et les joints.

Les détergents non ioniques sont les moins dangereux, bien qu'ils soient difficiles à éliminer. Ils sont hygroscopiques.

Le bifluorure d'ammonium peut être considéré comme peu dangereux pour le nettoyage des calcaires et des grès blancs.

La neutralisation est toujours une opération dangereuse et presque toujours inutile. Elle introduit des sels solubles dans le matériau [19.20].

- **Rabotage, meulage ou ponçage**

Ces méthodes consistent à éliminer mécaniquement l'encrassement tout en enlevant au moyen d'un rabot ou d'une meule une certaine épaisseur en surface du matériau dans le but de lui redonner son aspect neuf ou pour rectifier certaines inégalités. Ces procédés peuvent éviter le remplacement des matériaux de parement peu chancieux.

Pour choisir une méthode de nettoyage, on pourra se référer au tableau 1 ci-dessus en portant son attention à la nature du matériau à nettoyer, à l'état de celui-ci

Tableau 10 :

Recommandation sur les méthodes de nettoyage des salissures en fonction de la nature du matériau à nettoyer [20].

Matériau	caractéristiques	Méthode de nettoyage											
		G	P	V	P-V	T	A	G	P	V	P-V	T	A
Pierres calcaires	Tendre et poreux	-	-	C	C	D	D	-	-	C	C	D	D
		-	-	C	C	D	D	-	-	C	C	D	D
	Ferme	C	C	C	C	.	.	.	C	C	C	.	D
	Dure	C	C	C	C	.	.	.	C	C	C	.	D
	Dure rigoureux	C	C	C	C	.	.	.	C	C	C	.	D
	Dure Lisse	D	C	C	C	.	.	D	C	C	C	.	D
Grés		.	D	D	D	D	.	.	D	D	D	D	.
Autres		.	D	.	D	D	.	.	D	.	D	D	.
Granits	rigoureux	.	.	.	.	.	C	.	.	C	.	.	.
	Lisse	D	.	.	.	.	C	D	.	.	.	.	.
	Poli	D	.	.	.	C	D	D	.	.	.	C	D

Légende de tableau :

C : Conseillées en général (au point de vue efficacité, altération de surface, économie..),

- : utilisables mais non spécialement conseillées

D: déconseillées en fonction des altérations de surface, de pénétration d'eau, d'efflorescences,

G: grésage hydropneumatique

P: pulvérisation d'eau à basse pression (10 kgf/cm²)

+ Brossage

V. vapeur saturée humide

p- V: pulvérisation d'eau + vapeur saturée humide

T: traitement chimique à l'aide de produits tensio-actifs

A: traitement chimique à l'aide de produits acides à base de fluor

3.4. REFECTION DES MACONNERIES TRES ALTEREES

- **La consolidation des pierres désagrégées**

La désagrégation de la pierre correspond à la solubilisation du liant par transformation chimique puis à la migration des sels formés vers la partie externe de la pierre. La perte de liant entraîne une augmentation du volume poreux et l'affaiblissement des propriétés mécaniques. La conservation de la pierre doit avoir pour objectif un apport de liant pour remplacer celui qui a été détruit et une protection pour empêcher les pénétrations d'eau afin d'éliminer les altérations futures. L'agent de consolidation devra donc répondre aux exigences suivantes :

- un apport de liant d'origine minérale résistant aux dissolutions.
- un grand pouvoir de pénétration pour assurer la liaison entre la zone saine et la zone altérée.
- ne pas former de composés nuisibles (sels, etc.).
- ne pas engendrer des modifications susceptibles d'altérer la perméabilité à la vapeur d'eau et le coefficient de dilatation à la chaleur.
- ne pas modifier la couleur de la pierre.
- réduire la capacité d'absorption d'eau de la pierre [7,19].

Parmi les consolidants utilisés en troupe :

- à base de composés silico-inorganiques comme le silicate de sodium NaSiO_3 ou verre liquide qui par hydrolyse donne lieu à la formation de silice hydratée et d'hydroxyde de sodium qui est appelé procédé de silicatisation il est préconisé pour la consolidation des grés en raison de son affinité chimique avec la silice.

- à base d'autres composés minéraux comme la solution de chaux et de bicarbonate de calcium et aussi l'hydroxyde de baryum qui aboutit à la formation de carbonate de baryum, sel stable et peu soluble qui permet de consolider les calcaires poreux altérés.

- à base de composés silico-organiques comme le silicone les plus utilisés pour la consolidation des pierres sont (*siloxanes Si-O-Si*) et les (*silanes Si-C-Si*).

- des résines synthétiques monomères et polymères acryliques les plus utilisées sont les méthyl-méthacrylate et ethyl-acrylate ces composés sont polymérisent spontanément en présence de la lumière à température ambiante et en présence d'oxygène ils donnent de bonnes résultats en raison de leur bonne pénétration au cœur de la pierre [7].

- **Le remplacement des pierres très altérées (La méthode substitution)**

Quand il faut remplacer de la vieille pierre altérée par de la nouvelle. Il est nécessaire de prendre grand soin du choix de la nature de la nouvelle pierre si l'état général de la construction montre que la pierre utilisée s'est en général bien comportée. Il est préférable de restaurer avec la même nature à condition que pour la fonction précise que doit assumer la pierre ses qualités intrinsèques soient suffisantes.

La restauration traditionnelle s'effectue en insérant des blocs de pierre nouvelle à la place des blocs altérés qui on été retirés (méthode du refouillement). La liaison des nouveaux blocs avec l'ancienne construction s'effectue généralement avec un mortier à base de ciment métallique.

Des colles à base de résine époxyde ont été mises au point. Elles adhèrent parfaitement même sur un support humide et durcissent très rapidement. Il est possible de restituer des éléments naturels soit avec des mortiers artificiels à base de ciment amélioré par l'addition de résine, soit avec des mortiers dont le liant est constitué par de la résine [7].

CHAPITRE 4 :
LA CASBAH DE DELLYS

4.1. Situation géographique

La ville de Dellys est située à 106 km à l'Est de la capitale ALGER, à 76 km du chef lieu de wilaya de Boumerdes et à 50 km au nord de la ville de Tizi-ouzou. Au Nord, elle donne sur la mer méditerranée. Au sud, elle est limitée par une chaîne montagneuse (djebel ou ment Essouaf, djebel Bouarbi et djebel Sidi Moussa) qui est considérée comme une continuité de la chaîne montagneuse du Djurdjura. A l'Ouest, Dellys a pour frontière oued Sebaou qui la sépare de la commune de Sidi-daoud. A l'est, oued Oubai la sépare de la commune de Afir (voir figure 49). La ville de Dellys s'élève au dessus du niveau de la mer de 50 mètres.



Figure 49 : Situation géographique de Dellys.

4.2. Historique de la ville Dellys

Dellys est connue comme l'une des plus importantes villes côtières célèbres par son histoire et son patrimoine. Jusqu'à nos jours, les monuments représentés par les vestiges et les sites attestent de l'authenticité de cette ville et de sa profondeur historique.

- **La période phénicienne (du 3^{ème} au 12^{ème} siècle)**

Durant cette période, la ville avait pour nom RUSUCURUS. Des vestiges de la civilisation phénicienne, on retrouve la phase du cap de Djibissa au quartier MIZAB, attenant à la rue secondaire qui relie le quartier du MIZAB à celui de la marine dans le quartier européen en passant par la façade basse du quartier de l'hôpital militaire[14] .

- **La période Romaine (de 146 à 415 de l'an grégorien)**

C'est à cette période qu'on situe la fondation de la ville de Dellys comme une circonscription administrative romaine en l'an 42 du calendrier grégorien. Elle fut annexée au royaume de la Mauritanie césarienne. Elle était connue sous le nom de RUSUCURUS. La muraille de l'ancienne ville est un vestige qui témoigne encore de la forteresse au temps des romains.

- **La période Islamique**

Avec le début des conquêtes islamiques dans les pays du Maghreb arabe, la ville de Dellys a été soumise au pouvoir des conquérants arabes. Ce fut là le premier signe de l'entrée de la ville sous le règne musulman. Puis, elle vécut une vague de luttes politiques et dogmatiques qui s'étaient répandues au nord de l'Afrique et dans la presqu'île d'Andalousie dont le dénouement instaura la stabilité de la ville sous le règne des Fatimides IBADITES où la tribu des Adjissas berbères avait élu domicile.

- **La période Hamadite (1014-1153)**

À l'orée du 12eme siècle, la ville de Dellys est devenue dépendante du royaume Hamadite de Bejaia. De plus, une communauté andalouse fuyant le joug des Mourabitounes, à l'instar du gouverneur d'ALMERIA, Mouaaz Edawla ibn Samadah, s'y installa. Dans ce contexte, le savant Ibn Khaldoun déclare : « Mouaaz Edawla Ibn Samadah, en fuite devant l'avancée des Mourabitounes qui prirent possession de l'Andalousie, s'est dirigé vers El mansour quand Tatlès s'est trouvée sur son chemin... » Il a fondée la casbah de Dellys en 1068.

- **La période Mourabite Mouahidine (1179-1269)**

Durant cette période, la ville de Dellys a alterné conflits territoriaux et luttes idéologiques entre lesquels ces deux états se déchiraient parfois, sous le règne des Mourabite et d'autres fois sous celui des Mouahidites. Mais après la chute de l'Etat des Mouahidites, trois petits états différemment territorialement et politiquement apparurent. Les Hafsids en Tunisie, les Zianides à Tlemcen et les maronites au Maroc. Du fait de la présence de Dellys sur le territoire Hafsids, elle fut sous l'emprise de cet état en 1284 avant de se retrouver entre les mains des Zianides en 1352.

Ces conflits internes entre émirats islamiques ont nourri les hostilités et les ambitions expansionnistes de l'ennemi espagnol sur l'Afrique du nord, Dellys devint espagnole en 1400. Cependant, après l'assassinat du gouverneur général espagnol de la ville d'Alger en 1438, le royaume des Taâlibs « a pris possession d'Alger et de Tadmès... », Après son émergence politique. A l'orée du 16^{em} siècle, les espagnols réussirent à reprendre la ville de Dellys après leur prise de possession du port de mers el kébir d'Oran, du port de Bejaia et de la baie d'Alger en 1510.

- **La période ottomane (1517-1844)**

Durant cette période, les deux chefs turcs baba Aaroudj et Kheireddine Barberousse reprirent la ville de Dellys des mains espagnols en 1517, juste après les villes de Bejaia, de mers-el-kebire et d'Oran. Mais après le découpage administratif du protectorat d'Alger par les deux chefs Barberousse en circonscription-Est et circonscription-Ouest, la ville de Dellys devint le nouveau siège administratif de la circonscription est alors qu'Alger était celui de la circonscription ouest. C'est durant cette période que Dellys est visitée par le voyageur el Tadjeroti qui a fait le récit suivant : « nous avons amarré à la baie de Dellys qui comporte une muraille protectrice dont il ne reste pas grand chose aujourd'hui après la destruction due à la guerre... ».

A l'orée du 19^{eme} siècle et après la chute d'Alger aux mains des colons français un certain juillet 1830, la ville de Dellys est devenue une partie de l'état de l'Emir Abdel Kader qui nomma Ahmed ben Salem calife sur la ville avec pour base Bordj Sebaou. La ville demeura sous son règne jusqu'à l'occupation française en mai 1844.

4.3. La casbah de Dellys

La Casbah s'étend sur une superficie de 16,25 ha. Elle fut en 1844, lors de l'occupation française, séparée en deux par la nationale 24. La Basse-Casbah qui compte 7 ha et la Haute-Casbah qui en compte 9,25 ha. A leur arrivée, les colons détruisirent également plusieurs habitations mitoyennes avec Sidi El Boukhari, notamment la grande mosquée où séjourna l'émir Abdelkader en 1839 qu'ils convertirent en hôpital militaire. La Casbah comptait 1000 maisons et un nombre incalculable de fontaines, de mausolées, de fours et de forts. L'ensemble est entouré d'un mur essour, encore présent, dont certaines parties datent de l'époque romaine et Hamadite. Quelques portes telles que Bab El Bhar, Bab Eldjiyad, Bab Essour et Bab Eldjnane (voir figure 50).

4.4. Description de la casbah et ses constructions

Les constructions de la casbah de Dellys sont faites entièrement par un assemblage de plusieurs types de pierres taillées de couleur variée de jaune brunâtre, verte (figure 51, 52, et 53), grise qui sont de provenance locale utilisées dans les constructions des murs ainsi pour le revêtement pavage des rues et des ruelles.

Les maisons comportent toutes un toit fait de demi-briques assemblées, L'une de ces caractéristiques, qui se trouve à la casbah de Dellys le Riyad, élément d'importance pour la population, ne se retrouve pas dans les autres Casbah proprement turques comme celle d'Alger, mais, évoque plutôt les maisons de l'Andalousie, notamment celles de Grenade. Il se trouve en retrait par rapport au «wast eddar» et s'ouvre à l'extérieur. On y plante du basilic, du jasmin et des roses.

Cette Casbah est, à l'instar de toutes les autres, divisée en plusieurs quartiers par des rues principales et des ruelles secondaires. On y trouve dans la Basse-Casbah, quatre grands quartiers dénommés Houmatte Eddarb, Sidi Elboukhari, Sidi Elharfi, El Mizab et enfin le Marsa (port) qui faisait de Dellys une ville tournée vers la mer et abritée des vents par le cap Bengut. La Haute-Casbah en compte également quatre : Houmatte Salem, Hammam Erroum, Sidi Yahya et Sidi Mansour. Chaque quartier abrite le tombeau d'un saint construit à l'intérieur d'un Masjid faisant office d'école coranique, tandis que les grands patrons de la

ville, à savoir Sidi Abdelkader (El Djillani) et Lalla Matouba occupent les points les plus culminants ; Ras Ettarf ou Bordj Ihar pour le premier et Hammam Erroum pour la seconde. Elles ressemblent par certains éléments aux maisons de La Casbah d'Alger, elles s'en démarquent sensiblement, notamment par l'absence de terrasses. Après avoir franchi le portail, on pénètre dans la Skifa, alcôve surmontée dans de nombreux cas d'un Kbou qui n'est autre qu'un prolongement esthétique de la salle de séjour de l'étage. Ce kbou (voûte) forme du côté externe une Machrabiya typiquement ottomane. On accède ensuite au wast eddar ou el Houch, lieu de rencontre et de travail non sans avoir remarqué l'étable Adinine qui se trouve toujours proche de l'entrée et le makhzen où l'on dépose provisions et nécessaire de pêche. Autour de la cour précédemment citée, on retrouve Elbyout (les chambres), que l'on distingue bien des rhrof de l'étage ainsi que la buanderie, la cuisine, le hammam, l'incontournable puits et enfin le riyad. A l'étage, les eshayen (couloirs) s'ouvrent sur la cour et les rhrof dont la plus importante est amputée d'une partie pour le rangement du linge dénommée à juste titre le masrak [25].

La Casbah de Dellys ne ressemble pas à n'importe quelle Casbah, car elle est la sédimentation d'innombrables acquise thésaurisée à travers l'histoire. Elle est punico-romaine par sa muraille, andalouse par ses Ryads, ottomane par ses machrabiya, méditerranéenne aussi par son atrium et enfin berbère par l'intégration de l'étable au corps de la maison.

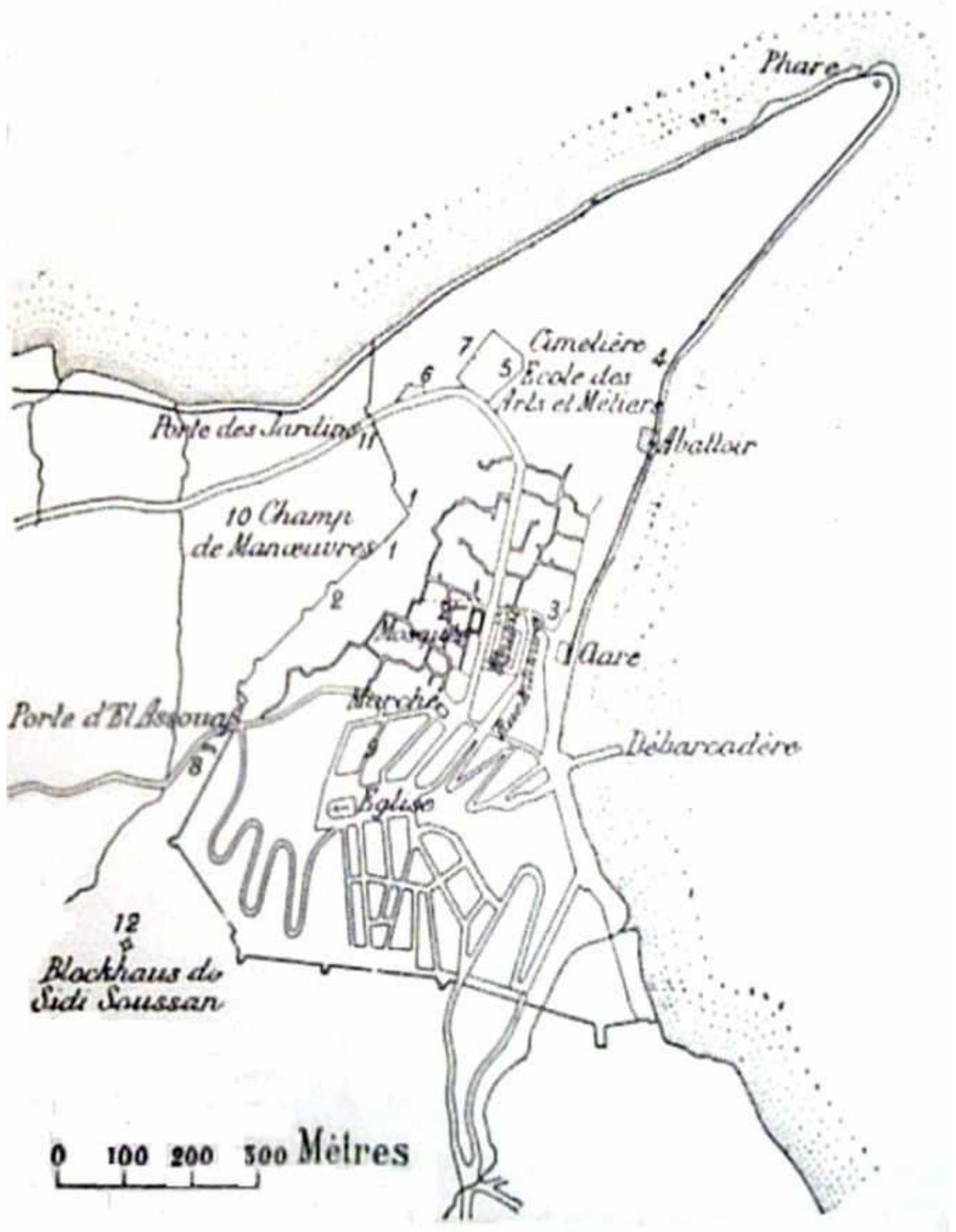


Figure 50 : Carte géographique de la casbah de Dellys.

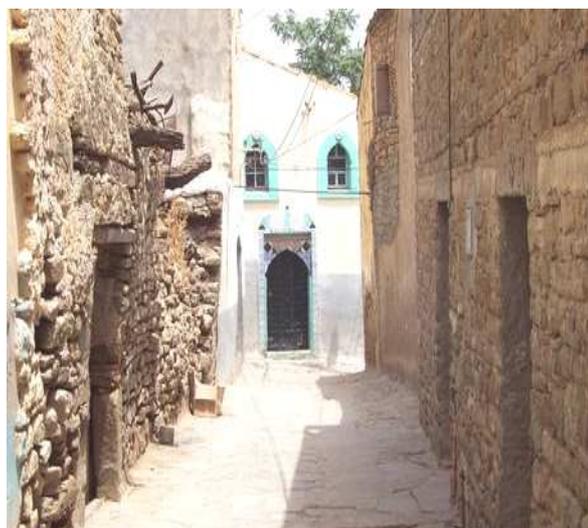


Figure 51: Quartier Sidi Elharfi a la basse casbah.

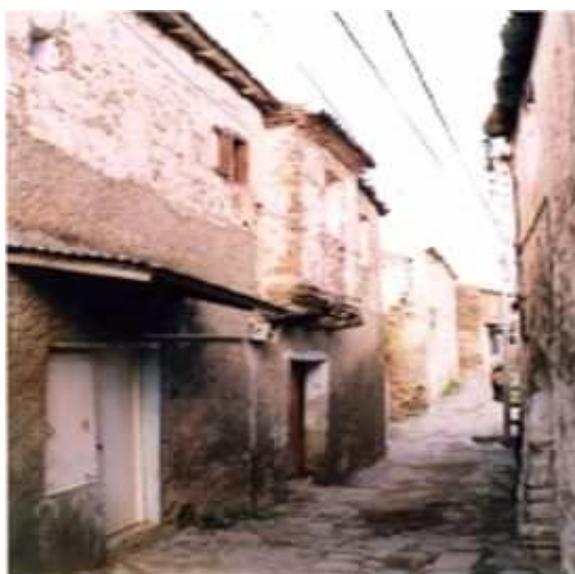


Figure 52: Quartier Mizab la basse casbah.

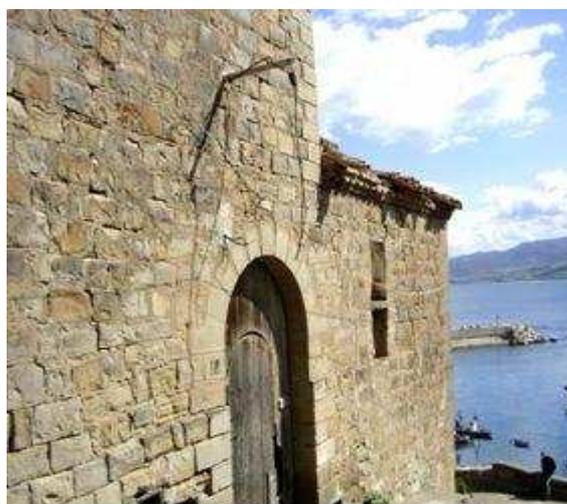


Figure 53 : Constructions faites totalement en pierre.

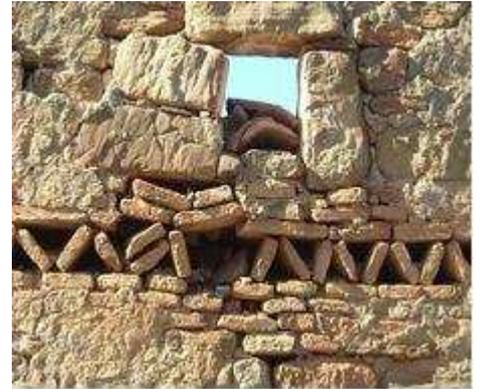
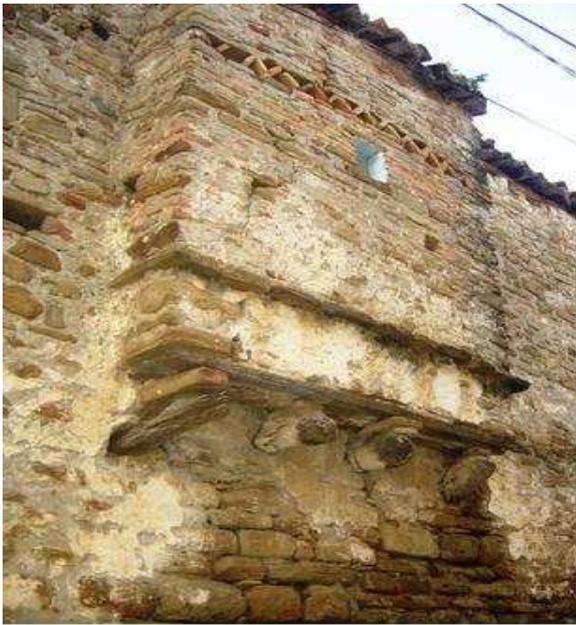


Figure 54: Techniques de construction des maisons.

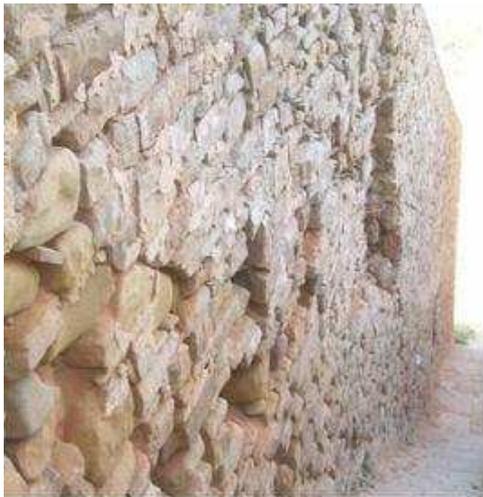


Figure 55: La muraille de la casbah

PARTIE 2 :
ETUDE DE LA PIERRE DE TAILLE DE LA CASBAH
DE DELLYS

CHAPITRE 1 :
IDENTIFICATION DE LA PIERRE DE TAILLE DE
LA CASBAH DE DELLYS

1.1. Echantillonnage et codification

L'identification de la pierre de taille de la Casbah de Dellys est réalisée sur 3 sortes de pierres de construction d'aspects et de formes différentes. Elles sont échantillonnées à partir d'endroits différents ainsi que de bâtisses les plus représentatives de la Casbah, le tableau 11 résume leurs aspects ainsi que leurs codifications.

Tableau11 :
Aspects des pierres étudiées

couleur	Endroit de prélèvement	Nom	échantillonnage	état
Verte	soubassement	A1	cœur de la pierre	sain
		A2	4 à 5 cm de la surface	Usure superficielle
Brune	soubassement	B1	cœur de la pierre	sain
		B2	4 à 5 cm de la surface	Friable et fragile
Grise	soubassement	C1	cœur de la pierre	sain
		C2	4 à 5 cm de la surface	Friable et fragile

1.2. Observations visuelles

Nos observations sont faites sur des sections polies pour une meilleure détermination de la texture et des caractéristiques superficielles.

- Pierre A₁

La roche A₁ à une texture cohérente massive et une couleur verte avec la présence de grains de tailles variables et de couleurs variant du vert au vert foncé dispersés de façon aléatoire donnant à la roche un aspect moucheté.

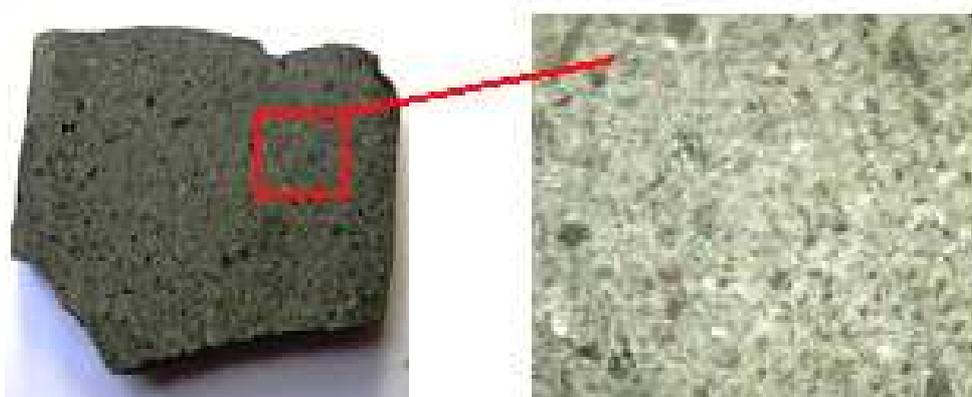


Figure 55 : Section polie de la roche A₁.

- Pierre B₁

La roche B1 à une texture cohérente de couleur brunâtre avec la présence des grains presque de même taille avec de couleurs variable (blanches, noires, brunes les plus dominantes), ou certains ont un aspect brillant, et dont l'ensemble ressemble à un sable fortement consolidé.



Figure 56 : Section polie de la roche **B1**.

- Pierre C₁

La roche C1 à une texture cohérente et une couleur grise avec la présence de grains de couleurs noire, blanche et grise et avec des tailles variables.

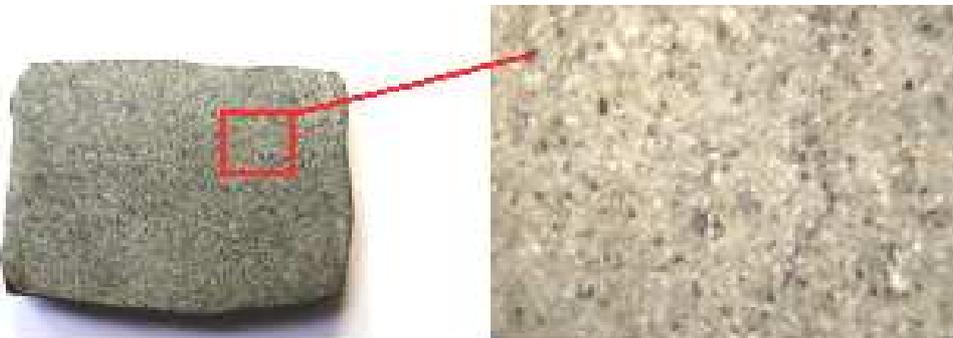


Figure 57 : Section polie de la roche **C1**.

1.3. Détermination des caractéristiques physiques

Nos essais se font sur 3 échantillons d'une même roche pour une meilleure représentation des résultats. Les essais sont réalisés selon les modes opératoires décrits ci-dessous et les résultats sont regroupés dans le tableau 12

- **Masse spécifique** à l'aide du densimètre *Candlot - le chatelier*, selon la méthode de pesée d'une masse pulvérulente <64 microns plongée dans l'eau distillée. Le calcul de ρ_{sp} se fait par la formule suivante :

$$\rho_{sp} = \frac{Mdp - Md}{5(\text{cm}^3)} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (1)$$

Mdp : masse du densimètre remplie d'eau et de poudre (g)

Md : masse du densimètre remplie d'eau (g)

5 : volume entre les deux repères du densimètre (cm³)

- **Masse volumique apparente**, par le volume d'eau déplacé d'un échantillon de poids connu :

$$\rho_{ap} = \frac{P}{Mv} \quad (\text{g/cm}^3) \quad (2)$$

P : Poids de l'échantillon (g)

Mv : Volume d'eau déplacé (cm³)

- **Absorption d'eau (Abs)**, par saturation d'eau de l'échantillon dans un bain-marie à une température de 60÷80°C, le calcul est effectué par la formule suivante :

$$Abs = \frac{Msat - Mse}{Mse} \times 100\% \quad (\%) \quad (3)$$

Msat : Masse du matériau saturé d'eau, en (g)

Mse : Masse du matériau sec, en (g).

- **La porosité totale Pt**, par la relation suivante :

$$Pt = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{sp}}\right) \times 100\% \quad (\%) \quad (4)$$

ρ_{ap} : masse volumique (g/cm³).

ρ_{sp} : masse spécifique (g/cm³)

- **La porosité ouverte (Pou)**, est estimée à partir de l'absorption

$$Pou \cong Abs \quad (5)$$

- **La porosité ferme (Pf)**, est déterminée par :

$$Pf = Pt - Pou \quad (6)$$

- **La dureté Mohs** est estimée selon le tableau 3.

Tableau 12 :
Caractéristiques physiques des pierres de tailles saines étudiées

Pierre	Masse volumique apparente ρ_{ap} (g/cm ³)	Masse volumique spécifique ρ_{sp} (g/cm ³)	Absorption d'eau Ab_s %	Porosité fermée P_{fe} %	Porosité totale P_{to} %	Dureté Mohs -
A1	2,50	2,74	2,42	6,03	8,45	≈6
B1	2,48	2,70	2,01	6,11	8,11	≈6
C1	2,70	2,80	1,59	1,85	3,44	≈6

1.4. Composition chimique

Elle est réalisée par spectroscopie de fluorescence X, par la méthode de la perle au borax avec un analyseur Siemens SRS 303 au Centre d'Etude Technologique d'Industrie Des Matériaux de Constructions (CETIM) Boumerdes. Selon les résultats du tableau 13, nous remarquons que toutes ces roches appartiennent à la famille des silicates, la présence de la silice est prépondérante dans tout les cas, alors que la chaux est presque au même niveau dans les 2 autres roches (B1, C1), avec un taux élevé (> 15 %) contrairement à la roche A1, où la chaux est faiblement présente (autour de 3 %). Nous pouvons dire que les roches B1 et C1 sont fortement carbonatées alors que la roche A1 appartienne aux silicates proprement dit.

Tableau 13 :
Composition chimique des échantillons A1 B1 et C1

Eléments	A1	B1	C1
SiO ₂	57,94	59,74	53,33
Al ₂ O ₃	14,07	9,29	6,74
Fe ₂ O ₃	8,06	3,75	3,52
CaO	3,11	15,56	16,50
MgO	4,25	1,36	1,10
K ₂ O	0,51	1,88	1,29
Na ₂ O	4,48	1,62	1,07
P ₂ O ₅	0,06	0,18	0,08
TiO ₂	0,62	0,50	0,35
SO ₃	0,22	0,03	0,17
Perte au feu	6,65	16,02	15,82
Total	99,97	99,93	99,97

1.5. Caractérisation minéralogique

Le dispositif expérimental utilisé est un diffractomètre de poudre de type D8 ADVANCE DRUKER du laboratoire d'Office Régionale d' Etude Géologique et Minière (ORGM) de Boumerdes. Il fonctionne avec la raie $\text{K}\alpha_1$ du Cuivre : $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ angström.

Selon la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

où d est la distance interréticulaire séparant deux plans de même famille (h,k,l), n est l'ordre de diffraction.

L'enregistrement est fait en 2θ variant de 2° à 80° . La source de rayons X est fixe et lorsque le porte échantillon varie d'un angle θ , le détecteur varie d'un angle 2θ .

Les résultats d'analyse minéralogique sont regroupés dans le tableau 14 et les spectres de diffraction X sont représentés par les figures 58, 59 et 60,

- **La roche A1**

D'après les résultats d'analyses minéralogiques la roche A1 est constituée principalement par des silicates. On note la présence de Quartz avec une concentration moyenne, des inosilicates représentés par le pyroxène de faible concentration, des phyllosilicates représentés par les micas (biotite+muscovite) avec une concentration moyenne de chlorite. Les tectosilicates représentés par les feldspaths plagioclase et d'andésine sont fortement présents. Les carbonates sont représentés par la calcite avec une concentration moyenne. On note aussi la présence d'une zéolite représentée par l'Analcime.

- **La roche B1**

La roche B1 est fortement carbonatée par la présence de calcite. Le quartz et les minéraux phyllosilicates (biotite + muscovite, chlorite) constituent aussi une grande partie de cette roche. Les feldspaths (plagioclases +microcline) sont présents avec une concentration moyenne, de silicates et de carbonates représentés par du quartz avec une concentration élevée, des avec une

concentration élevée, par la chlorite de concentration faible, et de tectosilicates représentés par les feldspaths avec une concentration moyenne.

- **La roche C1**

LA roche C1 a une composition presque identique que la roche B1 sauf que cette roche contient une concentration en micas plus faible et une concentration en feldspaths plus grande que la roche B1.

Tableau 14:

Résultats des caractérisations minéralogiques

Famille de roche	Composés	Roche A ₁	Roche B ₁	Roche C ₁
Silice	Quartz	++	++++	++++
Tectosilicates	Plagioclase/ Microcline	++	++	++++
	Andésine	+	-	-
	Analcime	+	-	-
Carbonates	Calcite	++	++++	++++
Phyllosilicates	Muscovite/Biotite	+	++++	++
	Chlorite	+++	+	+
Inosilicates	Pyroxènes	+	-	-

Légende : + présence faible, ++ présence moyenne, +++ présence forte, ++++ présence très forte

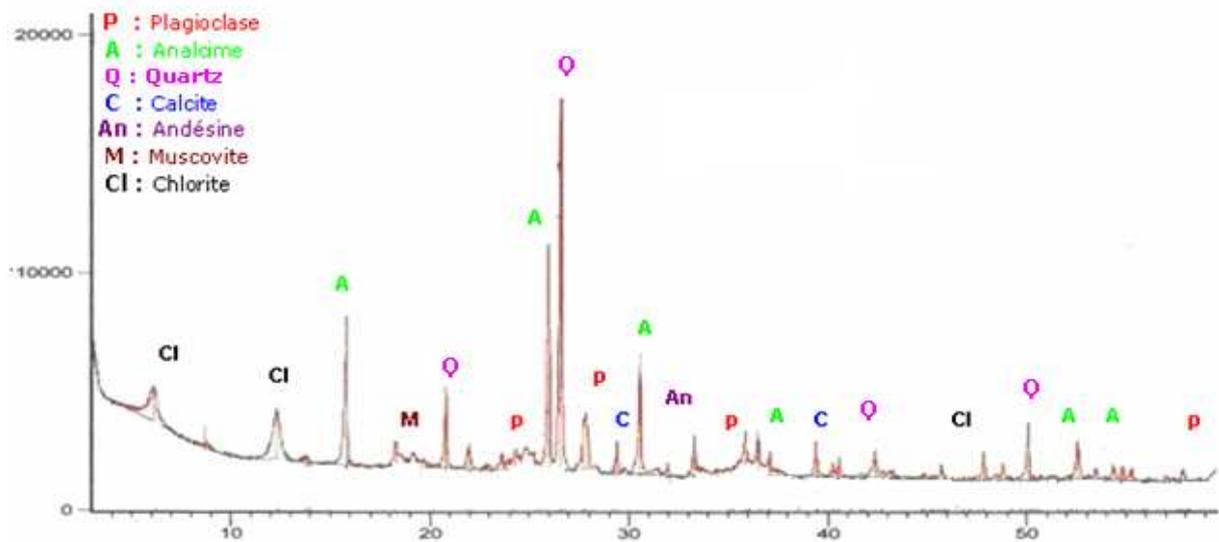


Figure 58: Spectre de diffraction des rayons X de la roche **A1**

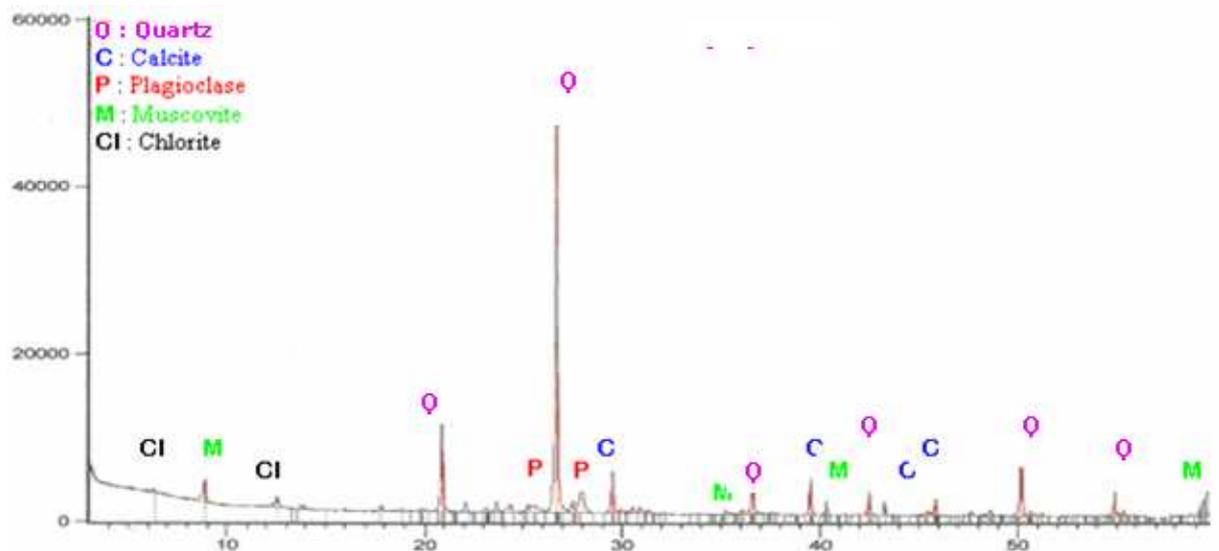


Figure 59 : Spectre de diffraction des rayons X de la roche **B1**.

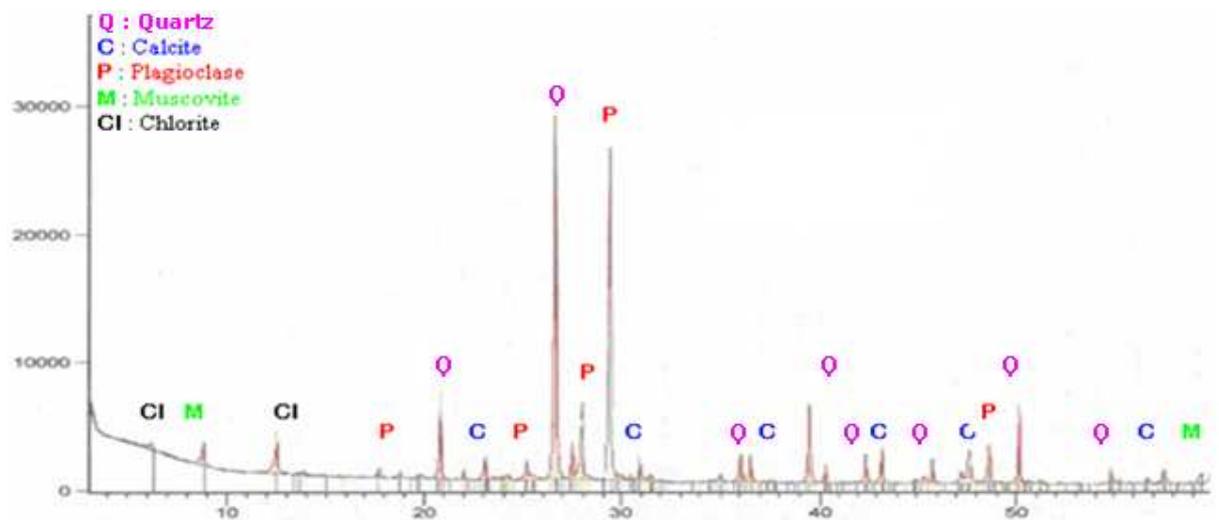


Figure 60: Spectre de diffraction des rayons X de la roche **C1**.

1.6. Analyse pétrographique sur lame mince

L'analyse minéralogique nous a permis d'identifier les minéraux qui se présentent dans les roches étudiées, pour la détermination des textures et les noms des roches on va étudier l'analyse pétrographique sur lame mince au microscope à lumière naturelle et polarisante. L'examen de lames minces se fait au microscope polarisant, à l'aide de cet appareil on observe la composition et la texture des minéraux selon le cas : des minéraux bien formés ayant des contours géométriques nets idiomorphes ou automorphes ou ayant des formes quelconque xénomorphes, le clivage et les éléments de symétrie, couleur et les altérations des minéraux.

Lame mince de la roche A₁

La roche A₁ renferme un matériel pyroclastique représenté par des fragments de roche de nature volcanique et de nombreux Cristalloclastes englobés dans un ciment de couleur verdâtre constitué, dans sa plus grande partie de chlorite micro-lamellaire en association avec de la calcite. Parmi ces minéraux nous notons la présence de restes de structures organogènes rendus difficiles à déterminer en raison de leur recristallisation par de la calcite.

Les images de la lame mince de la roche A₁ sont représentées sur la figure 61, et la composition minéralogique est donnée par le tableau 15.

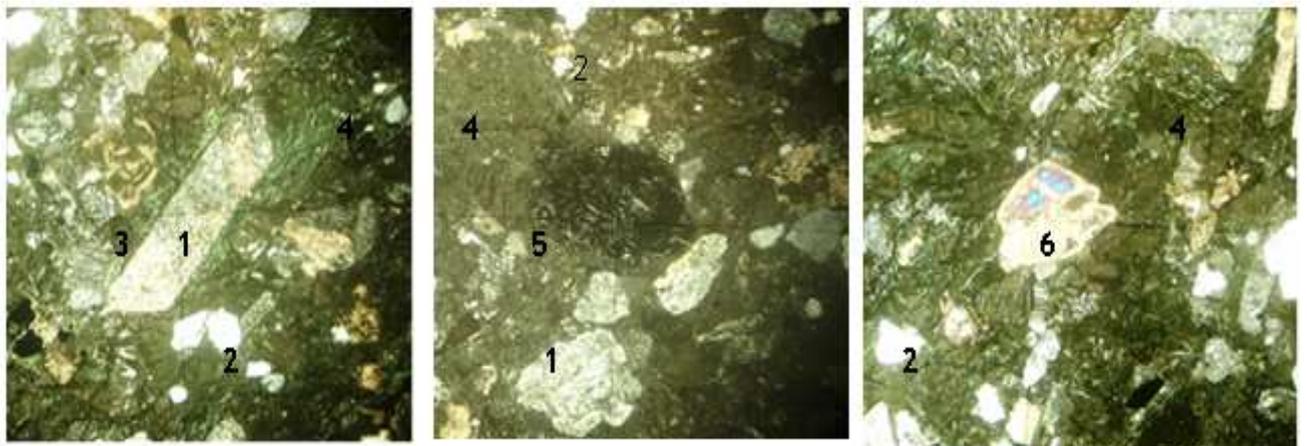


Figure 61 : Lame mince A₁ sous lumière polarisé (×6,3)

(1) Plagioclase, (2)-Quartz, (3)- Calcite, (4)- chlorite, (5)- Fragment d'andésite,
(6)- Pyroxène.

- ***Cristalloblastes***

Peu abondants ils sont représentés essentiellement par des cristaux disloqués à contours fortement corrodés de quartz, de plagioclase en cristaux fourchu à leur extrémités transformés totalement en séricite et en calcite corrodant les parties centrales du cristal quant aux pyroxènes, il ne restent reconnaissables que par leur forme prismatique, de rares cristaux laissent apparaître un cœur intact, on note également la présence de longues lamelles déformées déchiquetées de muscovite et de biotite chloritisée.

- ***Lithoclastes***

Ils sont représentés par des fragments d'andésite renferment de rares phénocristaux altérés de plagioclases dans un fond constitué par du verre volcanique fortement oxydé, opacifié de couleur marron brunâtre et de fins microlites de plagioclases orientés en tous sens.

Tableau 15 :

Composition minéralogique de la lame mince A₁

Composant	Pourcentage (%)	Dimension (mm)
Lithoclastes (fragments d'andésite)	08	≤0.4
Quartz	10	-
Plagioclases	15	≤0,1
Pyroxènes	02	≤0.4
Micas (biotite +muscovite)	01	≤0.3
Ciment (masse liante)		
Chlorite	55	-
Calcite	08	
Structures organogènes	<1	-
Minéraux opaques	1	-
Minéraux accessoires	<1	-

Lame mince de la roche B₁ :

La roche est constituée d'un matériel détritique gréseux mal usé et mal calibré représente essentiellement par du quartz se présentant en grains

xénomorphe aux arêtes subarrondies à subanguleuses et aux dimensions moyennes variant entre (0.05-0.4) mm, la plupart des grains de quartz montrent un aspect trouble du aux impuretés pélitiques très fines de nature argilo-ferrugineuses, certains présentent par contre une extension ondulant Les images de la lame mince de la roche B1 sont représentées sur la figure 62 , la composition minéralogique et donnée sur le tableau 16.

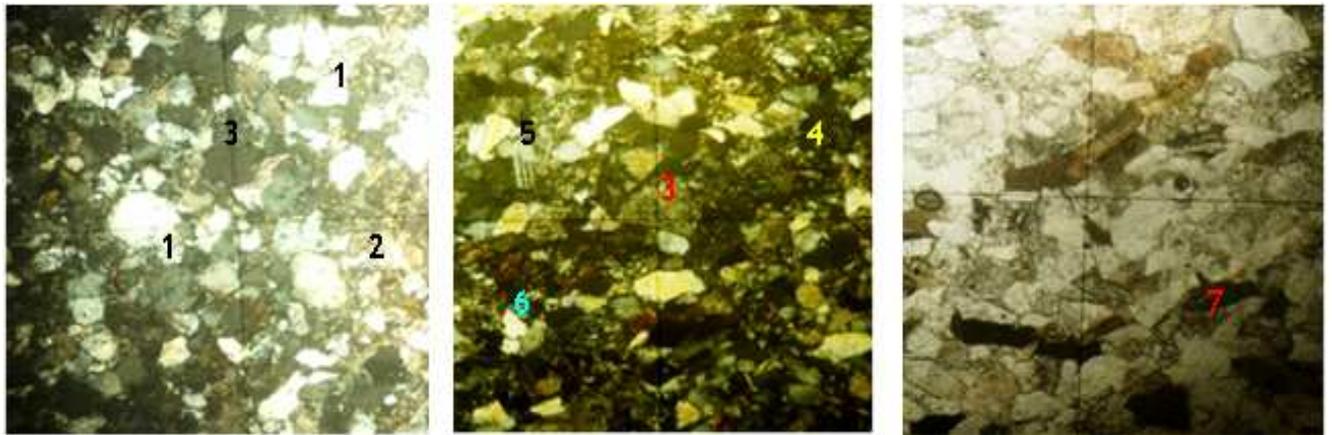


Figure 62: Lame mince B1 sous lumière polarisé (×6.3)

(1)- Quartz, (2)-Calcite, (3)-Plagioclase, (4)- Chlorite, (5)-microcline, (6)- débris de microquartzite, (7)- biotite

- **Feldspaths** : les Plagioclases se présentent en petits prismes trapus aux extrémités et avec des bordures creuses ils montrent souvent une transformation totale en séricite. Par endroits certains laissent apparaître des macles fines de l'olioclase et la Microcline se présente en petites plages à bords déchiquetés montrant un quadrillage flou souvent masqué par les hydroxydes de fer qui leur donnent une couleur rosâtre.
- **Micas** : la Biotite plus abondante, se présente en lamelle déchiquetées parfois effilochées irrégulièrement et fortement déformées par compression entre le quartz. Ils montrent souvent une transformation totale en chlorite cette chloritisation est accompagnée par l'expulsion des oxydes de fer sous forme de particules uniformes disposées le long du clivage et la Muscovite se présente en petites lamelles orientées suivant une direction préférentielle parallèles les unes aux autres.

- **Fragments de roches** : Ils sont représentés par des fragments de microquartzite constitués de très fins grains de quartz fortement engrenés les uns aux autres
- **Minéraux accessoires** : Le cortège minéralogique est représenté par de la tourmaline de couleur jaune verdâtre, le zircon et de rutile en petites baguettes aciculaires accompagnées par de petites particules de glauconie.
- **Ciment** : De type contact poreux, il est constitué par de la calcite en grains microcristallins.

Tableau 16 :

Composition minéralogique de la lame mince **B1**

Composants	Pourcentage (%)	Dimensions (mm)
quartz	28	0.04-0.4
Feldspath (plagioclase+Microcline)	18	0.05-0.15
Biotite	14	≤0.25
Muscovite	3	≤0.15
Chlorite	5	
Débris de microquartzite	4	
Minéraux accessoires (glauconie, zircon, tourmaline, rutile).	≤1	-
Minéraux opaques (oxyde de fer)	2	-
Ciment calcite	26	-

Lame mince de la roche C₁ :

Le matériel détritique composant la roche se caractérise par la prédominance du quartz se présentant en grains xénomorphe à contours indentés souvent aux arrêts anguleux et aux dimensions moyennes comprises entre 0,05-0,35 mm. Ils présentent un classement médiocre et sont non jointifs, certains montrent par contre une extinction roulante.

Les images de la lame mince de la roche C1 sont représentées sur la figure 63 a, b et c, la composition minéralogique est donnée sur le tableau 17.

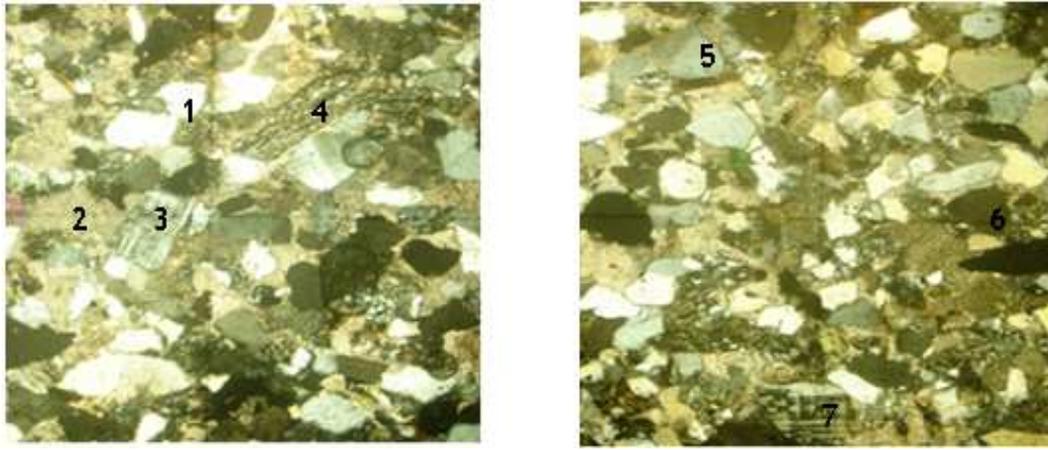


Figure 63 : Lame mince C1 sous lumière polarisé (x6.3)

(1)-Quartz, (2)- Calcite, (3)- Plagioclase maclé, (4)- Plagioclase Séricitisé, (5) Plagioclase-6)-chlorite, (7)-microcline.

- **Feldspaths** : les Plagioclases se développent en petits rectangles souvent fourchus a leur extrémités et avec un aspect squelettique souligné par des contours fortement corrodés. La plupart des cristaux sont envahis de fines écailles de sericite finement pigmenté d'hydroxydes de fer. Par endroits certains cristaux montrent des macles fortement tordues avec une disposition en marche d'escalier et la Microcline se présente en petites plages irrégulières avec le quadrillage caractéristique et rarement une faibles perthitisation et forte péliteisation.
- **Micas** : la Biotite se présente en logues lamelles fortement pleiochromotique dans les tons brun rougeâtre fortement déformées et tordues par compression entre les grains de quartz elle montre souvent une transformation totale en chlorite avec le clivage fibreux souligné Par alignement d'oxydes de fer et la Muscovite se présente en lamelles déchiquetées alignées suivant une direction préférentielle
- **Fragments de roches** : les fragments de quartzite sont constituées d'un engrainage de grains de quartz a contours denticulés localement tacheté d'oxydes de fer et les fragments d'aleurolite schisteuse sont constituées d'alternances de quartz intercalé de Fines écailles de micas disposées suivant un alignement parallèle.
- **Minéraux accessoires** : Zircon, tourmaline, glauconie.
- **Ciment** : De types contacte poreux constitué de calcite finement granulaire referment parfois des formes parfois relies de structures organogènes (foraminifères) totalement recristallisé.

Tableau 17 :

Composition minéralogique de la lame mince C1

Minéral	Pourcentage (%)	Dimension (mm)
Quartz	33	0.08-0.35
Plagioclase Microcline	15	0.05-0.25
Biotite	10	≤1
Chlorite	05	≤1
Muscovite	01	≤2
Débris de roches	08	-
Minéraux opaques (oxyde de fer)	≤1	-
Minéraux, accessoires (zircon, tourmaline, glauconie)	≤1	-
Ciment calcite	28	-

1.7. Caractérisation mécanique

La résistance mécanique à la compression est effectuée sur des éprouvettes de section (4cm x 4cm), et elle est calculée par la relation suivante :

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{\text{Force}}{16} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (7)$$

F : la force de rupture (kgf)

$S = 16$ la surface d'appui (cm)

La résistance mécanique à la flexion est effectuée sur de éprouvettes de (4x4x16 cm), et elle est calculée par la relation suivante :

$$R_f = \frac{3 \times l \times F}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (8)$$

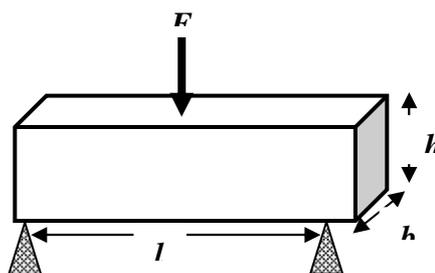


Figure 64 : Essai de flexion 3 points

Les résultats de caractérisations mécaniques sont regroupés dans le tableau 18

Tableau 18 :

Résultats des essais de flexion et de compression des roches étudiées

Echantillon	Résistance à la compression R_c (kgf/cm ²)	Résistance à la flexion R_f (kgf/cm ²)
A1	124,37	11,66
B1	142,97	12,83
C1	162,81	17,53

1.8. Conclusion :

D'après les observations des lames minces des 3 roches (**A1**, **B1**, **C1**) nous pouvons conclure que :

1. **A1** est une roche volcanique constituée de quartz, de micas, de feldspaths et des débris de roches volcaniques liés par une matrice de chlorite connue sous le nom de *tuf volcanique ou Tuffite*.

2. **B1** est une roche sédimentaire d'origine détritique constituée de quartz, de micas et de feldspaths liés par une matrice de calcite connue sous le nom de *Grés micacé*.

3. **C1** est une roche sédimentaire d'origine détritique constituée de quartz, de feldspaths et de micas liés par une matrice de calcite connue sous le nom de *Grés polygénique*.

CHAPITRE 2 :
ETUDE DE L'ALTERATION DE LA PIERRE DE LA
CASBAH DE DELLYS

2.1. Introduction

Pour déterminer les types d'altération dont est sujette la pierre de taille de la Casbah de Dellys, nous nous proposons de comparer la roche saine par rapport à la pierre qui a subi une altération dans la bâtisse de la Casbah au cours du temps. Pour ce faire nous étudierons les changements dans les caractéristiques (physiques, minéralogiques) qui se passent généralement dans les pierres de construction sous l'action des éléments naturels. Dans notre cas la Casbah fait face à la mer, et les montées capillaires d'humidités ne sont pas négligeables.

2.2. Les altérations physiques

Nous étudions les altérations physiques en déterminant de nouveau la masse volumique, l'absorption et la porosité totale des pierres issues des bâtisses anciennes. Les résultats de caractérisations physiques sont regroupés dans le tableau 19, et nous proposons l'histogramme de la figure 65 pour faire une comparaison entre les deux états.

Dans tout les cas nous observons une diminution de la masse volumique et une augmentation de l'absorption d'eau. Cette observation est plus nette dans le cas de roches B et C qui est bien plus carbonatée que les deux autres roches A. Nous pensons que les phénomènes d'altérations par dissolution de calcaire à travers le réseau capillaire de la roche en est le principal responsable. Le phénomène peut être décrit selon la réaction chimique suivante :



Cette altération qui est une perte en matière, le calcaire dissout par l'humidité est évacué de la pierre en laissant des vides augmentant ainsi la porosité, et en dégradant la tenue mécanique de la structure qui devient moins compactes.

Tableau 19:

Détermination de la masse volumique et absorption d'eau de pierres altérées

Pierre	Masse volumique apparente ρ_{ap} (g/cm ³)	Masse volumique spécifique ρ_{sp} (g/cm ³)	Absorption d'eau Ab_s %	Porosité fermée P_{fe} %	Porosité totale P_{to} %
A2	2,48	2,74	3,06	7,47	9,31
B2	2,38	2,70	3,34	8,16	11,51
C2	2,56	2,80	2,49	5,71	8,20

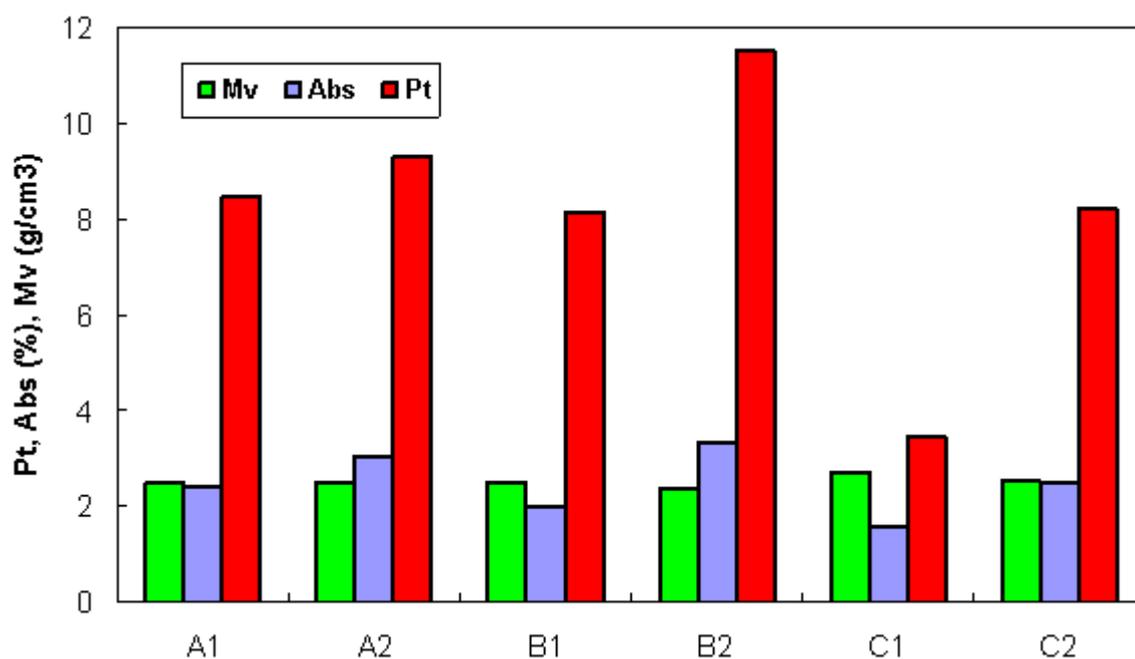


Figure 65 : Comparaison des caractéristiques physiques de roches saines par rapport a celles altérées.

2.3. Les modifications minéralogiques

Nous étudions les modifications minéralogiques des pierres altérées en utilisant deux moyens d'investigations :

- la diffraction X en comparant les spectres d'identifications de minéraux de pierres des 2 états; sain et altéré, et
- l'analyse thermique différentielle associée à la perte de poids ATD-TG, en comparant la courbe de la pierre saine par rapport à la pierre altérée.

1- D'après les résultats d'analyse minéralogique que nous reportons dans le tableau 20 et les spectres de diffraction X des figures 66, 67 et 68, nous observons :

Tuf altéré A2

Les minéraux silicatés n'ont pas subi de modifications remarquables (qualitatives ou quantitatives) sous l'action d'éléments d'altération, certainement à cause de la grande résistance des silicates face aux différents agents qui peuvent induire des transformations minéralogiques de la pierre en œuvre. Au contraire les raies des carbonates (calcite) ont presque disparues de la pierre de Tuf altéré (A₂), certainement que la calcite a subi une dissolution sous l'action de l'eau combinée avec le CO₂ qui circule dans le réseau poreux selon la réaction suivante :



Cette constatation est confirmée par la diminution de la masse volumique et l'augmentation de l'absorption d'eau du Tuf (Tableau 19). La déperdition de la matière conduit à la création de pores et de capillaires donnant vers l'extérieur de la pierre.

La calcite associée au chlorite constitue le ciment des grains de silicates dans le Tuf, et sa perte par dissolution provoque la décohésion de ces grains, et conduira la destruction de pierres de construction de Tuf.

Gré micacé (B₂) et Grés polygénique altérés (C₂) :

Les mêmes observations sont relevées sur les 2 grès; seulement le phénomène à un effet plus grave sur les pierres de grés (micacé et polygénique) que dans le cas des pierres de tuf. Le ciment dans les grés est constitué totalement de calcite alors que dans le tuf nous avons un ciment constitué de chlorite et de calcite. La chlorite résiste mieux à la dissolution alors que la calcite peut disparaître totalement sous l'action continue de l'eau et du gaz carbonique (voir tableau 9). Les pierres de grés sont donc moins résistantes et si la dissolution du calcaire est totale, les pierres perdent totalement leurs tenues et se transforment en masse pulvérulente.

Tableau 20:

Résultats des caractérisations minéralogiques de pierres altérées

Type de roche	Composés	Roche A ₂ Tuf	Roche B ₂ Grés micacé	Roche C ₂ Grés polygénique
Silice	Quartz	++	++++	++++
Tectosilicates Feldspaths	Plagioclase/ Microcline	++	+++	+++
	Analcime	+	-	-
	Andésine	+	-	-
Carbonates	Calcite	++	++	++
Phyllosilicates	Muscovite/Biotite	+	++++	++
	Chlorite	+++	+	+
Inosilicates	Pyroxènes	+	-	-

Légende : + présence faible, ++ présence moyenne, +++ présence forte, ++++ présence très forte

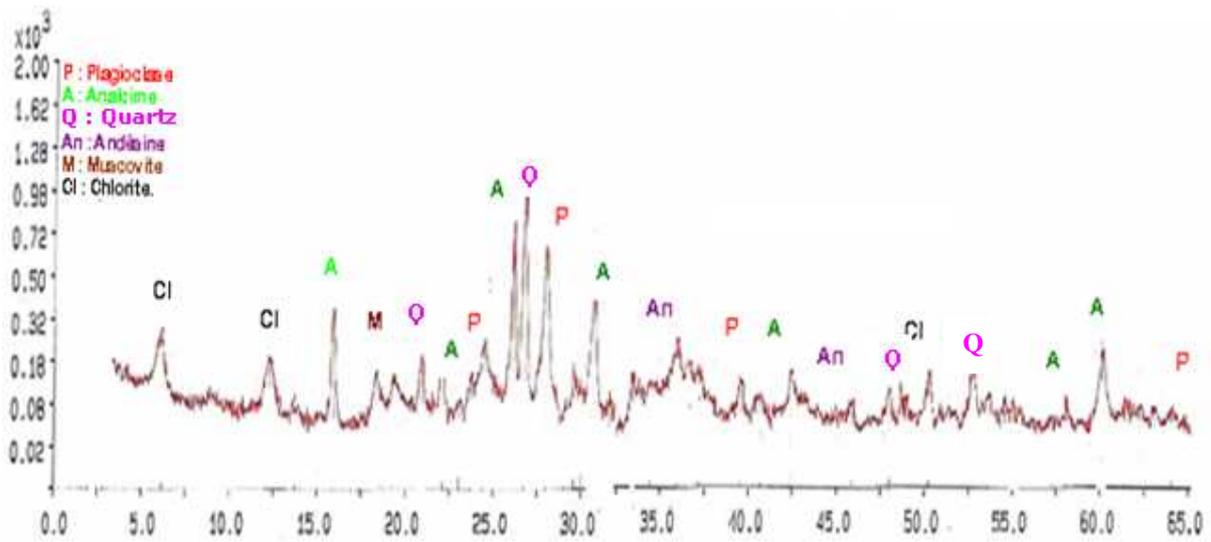


Figure 66: Spectre de diffraction X de la pierre A.

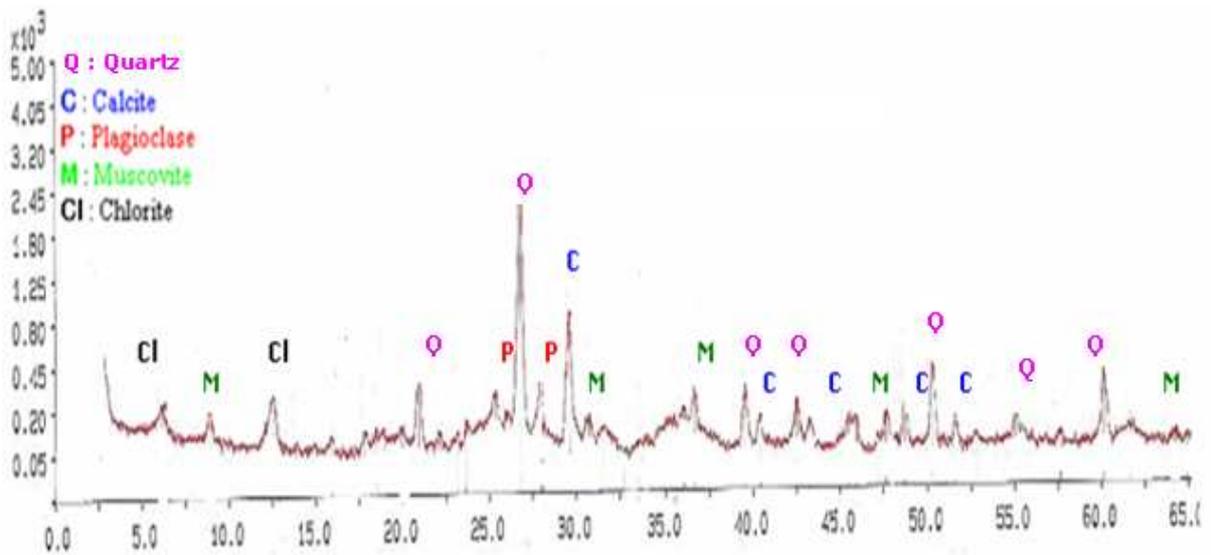


Figure 67: Spectre de diffraction X de la pierre B2

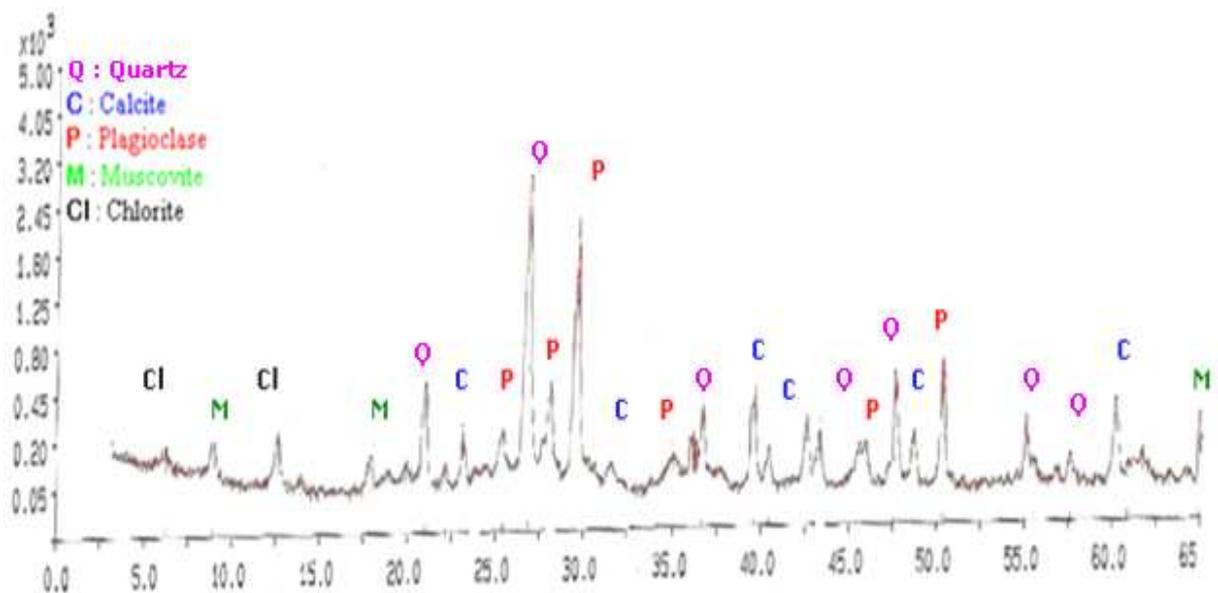


Figure 68: Spectre de diffraction X de la pierre C2.

- **Résultats de l'analyse ATD-TG**

L'analyse ATD-TG s'avère très utile en montrant les effets de l'altération sur les pierres, ainsi donc nous observons :

- **Pierre de Tuf A1 et A2**

La pierre A2 montre une humidité supérieure à celle de la roche naturelle; les pertes de poids associées à des pics endothermiques vers 130 °C, montrent clairement ce phénomène; 1,39 % et 2,99 % respectivement celle de la pierre A1 et la pierre A2. Autrement dit la pierre qui est mise en œuvre (A2) absorbe de l'eau au cours du temps. Cela se traduit certainement par une altération de ses propriétés d'emploi par l'humidité. Des pics exothermiques sont observés pour les roches vers 480° - 490°C et qui sont associés à des pertes de poids de mêmes valeurs, 1,60 % - 1,83 %, qui peuvent être une combustion de matières organiques. Mais le plus remarquable c'est le pic endothermique qui se situe à 734,8 °C présent dans la roche naturelle que nous pouvons assimiler à la destruction des carbonates avec un dégagement de CO₂. La perte de poids à cette température est relativement plus élevée dans le cas de la roche saine; ce qui indique une certaine perte de calcaire par lessivage dans le cas de la pierre A2. Toutefois le phénomène n'est pas très marqué; la pierre de tuf semble résister aux effets de dégradation de la nature.

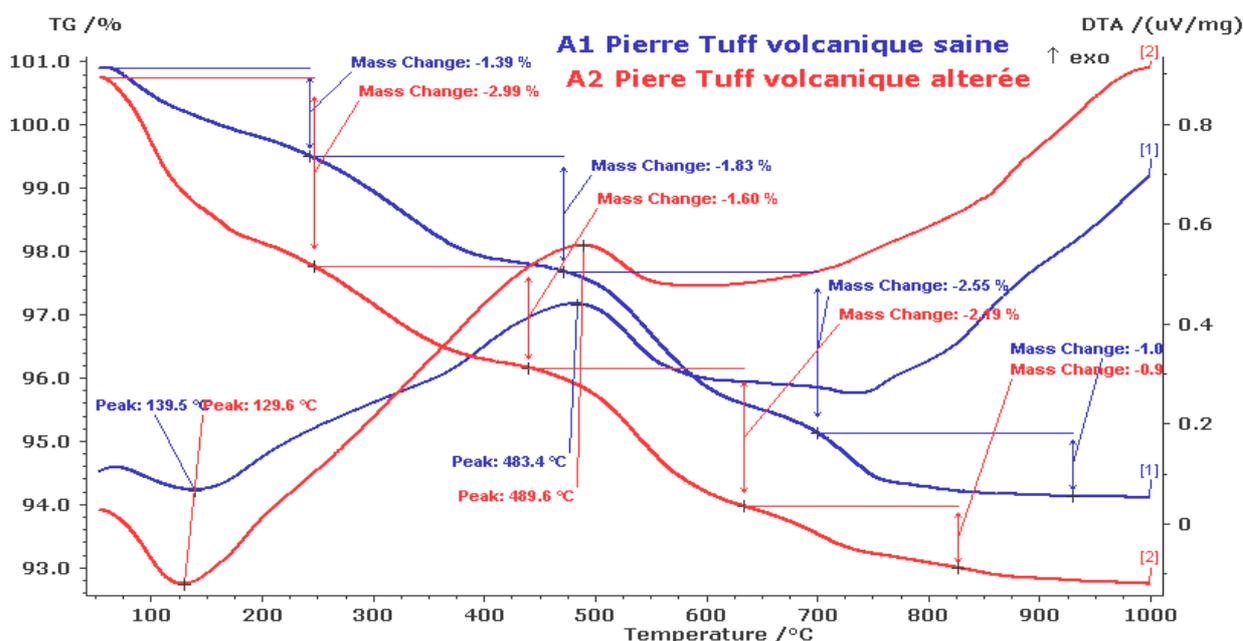


Figure 69 : Analyse ATD-TG de la pierre de Tuf A1 et A2

- Pierre de Grès micacé B1 et B2

Nous observons la même constatation concernant l'humidité, que dans le cas du Tuf; le grès altéré B2 est plus humide que le grès sain B1, ce qui montre que les pierres en œuvre subissent l'action de l'humidité. La deuxième observation concerne la teneur en carbonate (principalement calcite) qui se trouve fortement réduite dans le cas du grès altéré; la perte de poids vers 800 °C (décarbonatation) est de ~5 % environ pour le grès B2, alors que pour le grès B1, elle est de l'ordre de ~10 %; la roche a perdu 50 % de son ciment calcaire. La dégradation de la pierre est fortement accentuée par cette perte, étant donné que le calcaire constitue le ciment de la pierre de grès.

Ce résultat confirme le phénomène de dissolution du calcaire par lessivage naturelle.

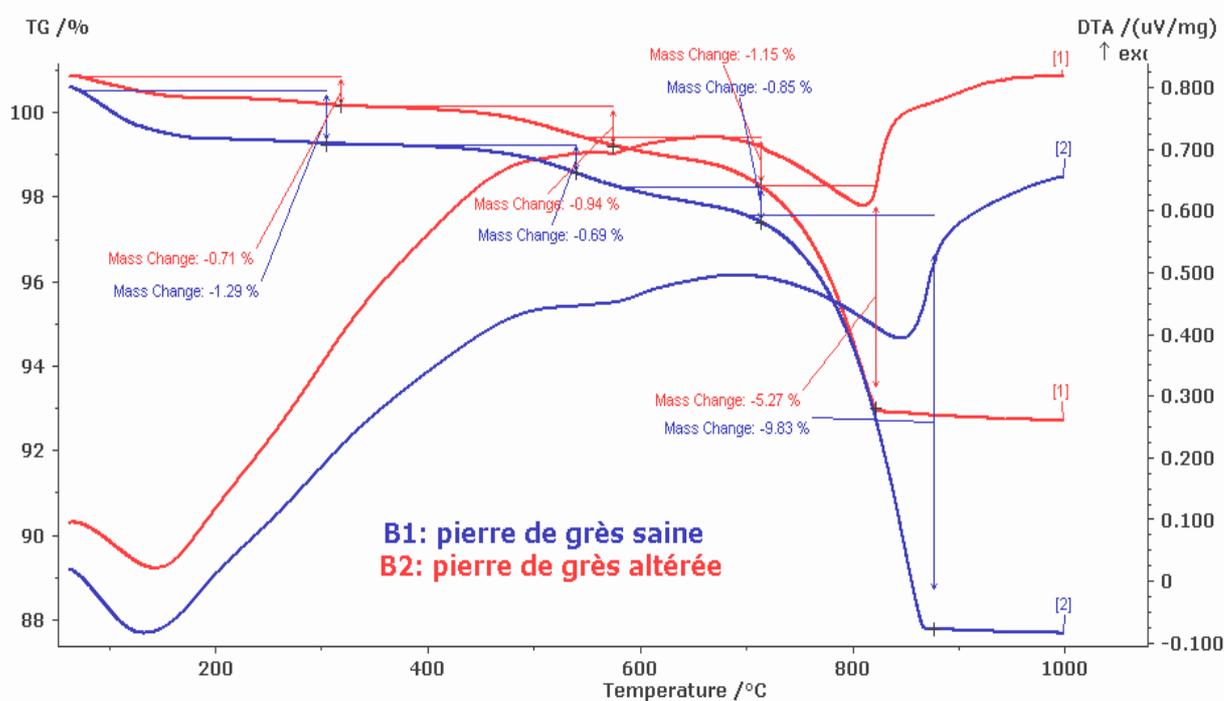


Figure 70 : Analyse ATD-TG de la pierre de grès micacé B1 et B2.

- Pierre de Grès polygénique C1 et C2

Les mêmes observations sont relevées sur la pierre de grès polygénique C2, une forte absorption d'eau : 2,56 %. Le phénomène de perte de calcaire par lessivage est bien net; la roche C2 a perdu plus de 50 % de son ciment calcaire; la perte de poids vers 800 °C (décarbonatation) est de ~4 % environ pour le grès C2, alors que pour le grès C1, elle est de l'ordre de ~10 %. Cette perte de calcaire entraîne une dégradation certaine de la pierre; notamment sa tenue mécanique.

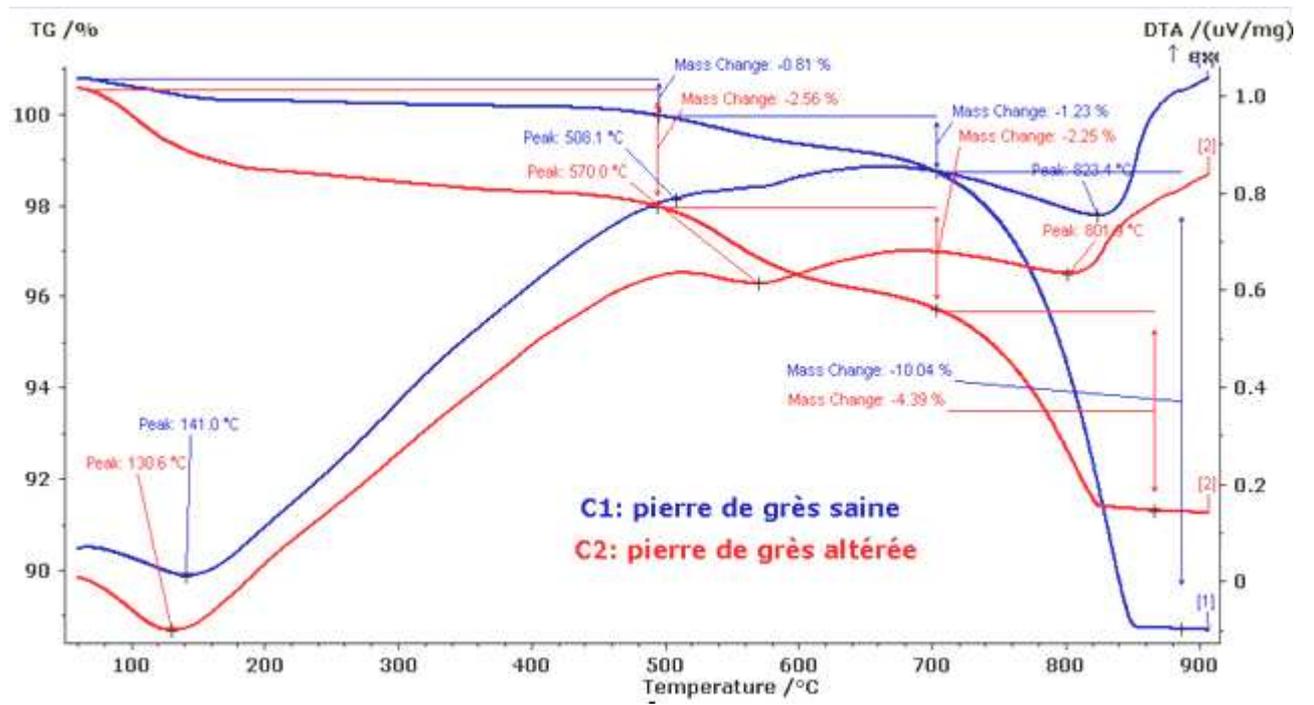


Figure 71 : Analyse ATD-TG de la pierre de grès polygénique C1, C2.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse de Magister s'inscrit dans le programme de la réhabilitation et la restauration de cité historique de la Casbah de Dellys qui fait partie du patrimoine de notre pays. Ce programme est un grand challenge que devra soulever l'Etat, il concerne tout les aspects que soulève la cité pour nouvelle naissance, à savoir la reconstruction des bâtisses tout en respectant le coté historique, l'aspect social et économique, et bien d'autres. Pour notre cas, nous nous sommes intéressés à la pierre avec laquelle était construite la Casbah, pour permettre au bon choix de ce matériau pour la restauration.

Pour ce faire nous avons procédé à l'identification de la roche dont est issue la pierre de construction. Différents moyens d'investigations sont utilisés pour atteindre ce premier but; la diffraction x, l'analyse pétrographique sur lames minces, l'analyse thermique ATD-TG, ainsi que la détermination des caractéristiques physiques comme la masse volumique et spécifique, la porosité et l'absorption d'eau, ainsi que la dureté MOHS.

Les résultats d'identification montrent que les pierres de construction sont issues de grès et de Tuf volcaniques.

Dans un deuxième temps nous avons procédé à l'étude de l'altération des pierres mise en œuvre dans les constructions de la casbah en comparant leurs caractéristiques physiques et les changements chimiques et minéralogiques par rapport aux roches saines.

Les moyens d'investigations, diffraction X et l'analyse thermique ATD-TG, ainsi que la détermination des caractéristiques physiques des pierres des bâtisses de la Casbah, nous ont permis de constater et de confirmer que ces matériaux de construction d'origine naturelle subissent toujours une dégradation et une altération sous l'action des éléments naturels.

La détermination des propriétés physiques des roches saines et des roches altérées montre clairement que leur propriétés physiques sont changées (masse volumique diminue, porosité et absorption augmente); ce qui aura pour conséquence une dégradation de toutes les propriétés d'emplois (comportement mécanique, isolation).

L'importance de l'altération est fonction de la nature de la roche dont est extraite la pierre; la pierre de Tuf semble mieux résister que celle des Grès. Nous avons constaté nettement d'après les analyses ATD-TG, que ces pierres perdent

leur ciment calcaire sous les effets de lessivage. Ce phénomène peut être destructeur de ces matériaux dont mesure où il n'aura plus de liant pour tenir les grains.

Les résultats de l'analyse minéralogique des roches altérées vont dans le même sens; nous observons une diminution des raies caractéristiques de la calcite.

Par conséquent, nous recommandons la substitution des pierres très altérées par l'utilisation de pierres de Tuf dans les endroits où le risque de lessivage et de montée d'humidité sont importants. Les pierres de grès peuvent être réservées en haut des constructions et dans les endroits qui sont à l'abri des pluies et de la mer.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- A- CHABAS (*Rôle de l'environnement atmosphérique marin dans la dégradation des marbres et du granite de Délos Grèce*) thèse de doctorat université Val de Marne Paris novembre 1997.
- [2]- A. BOUINEAU A. ET R -PERRIER (*La décohesion granulaire, maladie des façades en marbre*) Mines et Carrières, vol. 77, Paris août 1995,
- [3]- CH -POMEROL, L -YVES, M -RENARD (*éléments de géologie*) édition Dunod, Paris 2002 (746p).
- [4]- CLARA URZÌ ET FILOMENA DE LEO (*Biodétériorations of Cultural Heritage in Italy*) Department of Microbiological, Genetic and Molecular Sciences University of Messina, Italy 1996.
- [5]- D- STEFAN MORARU (*l'humidité dans les bâtiments causes, effets, remèdes*) Bucarest, 1984.
- [6] J. JACKERS (Fond de Formation Professionnelle de la Construction FFPC), Bruxelles, 1990
- [7]-J-PHILLIPON, D-JEANNETTE et R- LEFEVRE (*altération des pierres monumentales en France*) CNRS édition /Ministère de la culture Paris 1990.
- [8]- J-PHILLIPON (*la dégradation de la pierre*).institut de formation des restaurateurs d'œuvre d'art (ENP-IFROA) France 1997.
- [9] - J - PHILIPPON (*pétrographie*) école nationale du patrimoine France novembre 1997.
- [10]- JEAN-DEDIER MERTZ (*Altération des matériaux du patrimoine: influence des contaminants et de la nature des substrats*) 18^{ème} Journées Scientifiques de l'Environnement, Créteil, Hôtel du Département, 03 mai 2007.

- [11]- J -Pochon (*facteurs biologiques de l'altération des pierres*) Paris 1982.
- [12]- J - GUILLEMOT (*éléments de géologie*) édition Technip paris 1976 (176p).
- [13]-J-JUNG (*le précis de pétrographie*) édition Masson 1958 (314 p).
- [14] IBN KHALDOUN (*Histoire des berbères et des dynasties musulmanes de l'Afrique Septentrionale*). Traduit par Mac de Guike Slane Edition Geutner Paris (1978).
- [15]- K- BECK (*Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité*) thèse doctorat L'université D'ORLEANS octobre 2006.
- [16]- L Nardi (*la consevazione sullo scavo archeologico*) Centro di consevazione archeologica CCA ICCROM Roma 1986.
- [17]- M. ANGELI, J.-P. BIGAS, B. MENENDEZ, R. HEBERTI ET C. DAVID (*Altération par les sels des pierres de construction*). Université de Cergy-Pontoise, Laboratoire (CNRS UMR 7072).
- [18] - M- RAUTUREAU, G-PIERRE C- HARTMANN (*Monuments en tuffeau*) guide pour la restauration et l'entretien Université d'Orléans 2000.
- [19] P- BRANDOIS ET F- BABICS (*Manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie*) Direction de l'Architecture et du Patrimoine France juin 2006
- [20] P. DE HENAU R. GERARD. MEERT ET A. PIEN (*rénovation -nettoyage et assèchement des bâtiments anciens*) Institut Royal du Patrimoine Artistique 1979.
- [21]- P. WATKISS, N. EYRE , M. HOLLAND, A. RABL ET N. SHORT (*Effets de la pollution atmosphérique sur les matériaux de construction*) AEA Technology, UK Janvier 2001

[22]-REYES TRUJEQUE (*Stone degradation by environmental pollution:The case of Seville, Spain*) international workshop 16-21October, 2005

[23]-R.VAN GRIEKEN, F. DELALIEUX et K. GYSELS (*Cultural heritage and the environment*) University of Antwerp (U.I.A), Belgium Juin 2000.

[24] V- FEDOROV (*procèdes de protection des monuments contre l'humidité ascendante*)(Moscou) Décembre 1981.

[25] Y- CHAÏD-SAOUDI (*SOS pour La Casbah de Dellys*) Docteur en préhistoire, département d'archéologie Université d'Alger. El- Watan journal quotidien 15 juin 2003.

ANNEXES

Md+e+ech: masse du densimètre remplie d'eau et de matière (g).

Md + e : masse du densimètre remplie d'eau (g).

V : volume entre les deux repères du densimètre (5 cm³)

Ms : Masse du matériau sec, en (g).

Mh : Masse du matériau saturé d'eau, en (g).

ρ_{sp} : Masse spécifique (g/cm³)

ρ_{ap} : Masse volumique (g/cm³).

P_{to} : Porosité totale.

P_{fe} : porosité ferme.

Ab_s : Absorption d'eau.

Rf : Résistance mécanique à la flexion

Rc : Résistance mécanique à la compression.

Tableau 21 :

Détermination de la masse volumique et absorption d'eau de roches saines.

ech	N°	Md+e (g)	Md+e+ech (g)	V (cm ³)	ρ_{sp} (g/ cm ³)	ρ_{sp} moy (g/ cm ³)	P_{to} (%)	P_{fe} (%)
A1	1	90,71	104,41	5	2,73	2,74	8.45	6.03
	2	90,75	104,44	5	2,73			
	3	90,78	104,51	5	2,74			
B1	1	90,74	104,28	5	2,70	2.70	8.13	6.11
	2	90,73	104,25	5	2,70			
	3	90,79	104,25	5	2,69			
C1	1	90,63	104,66	5	2,80	2.80	3.44	1.85
	2	90,71	104,68	5	2,79			
	3	90,79	104,76	5	2,79			

Tableau 22 :

Détermination de la masse spécifique, porosité totale et fermée de roches saines

Ech	N°	Ms (g)	Mh (g)	V (cm ³)	ρ_{ap} (g/ cm ³)	ρ_{ap} moy (g/ cm ³)	Absorption d'eau Ab_s (%)
A1	1	208,2	213,25	82	2,53	2,50	2,01
	2	233,23	238,88	92	2,50		
	3	18856	193,15	76	2,48		
B1	1	204,21	208,28	82	2,49	2,48	2,11
	2	195,21	199,21	79	2,47		
	3	223,33	227,83	90	2,48		
C1	1	259,24	263,16	96	2,70	2,70	1,59
	2	288,65	293,21	107	2,69		
	3	191,99	195,22	71	2,70		

Tableau 23 :

Valeurs des résistances à la compression de roches saines.

Echantillon	N°	R_c (kgf/cm ²)	R_c moyenne (kgf/cm ²)
A1	1	126.10	124.37
	2	128.31	
	3	118.72	
B1	1	144.34	142.97
	2	136.26	
	3	148.32	
C1	1	157.11	162.81
	2	161.21	
	3	170.13	

Tableau 24 :

Valeurs des résistances a la flexion de roches saines.

Echantillon	N°	R_f (kgf/cm ²)	R_f moyenne (kgf/cm ²)
A1	1	11.45	11.66
	2	13.08	
	3	10.45	
B1	1	13.26	12.83
	2	14.11	
	3	11.14	
C1	1	16.36	17.53
	2	19.02	
	3	17.21	

Tableau 25

Détermination de la masse volumique et absorption d'eau de roches altérées.

ech	N°	Ms en (g)	Mh en (g)	V (cm ³)	ρ_{sp} (g/ cm ³)	ρ_{sp} moy (g/ cm ³)	Absorption d'eau Ab_s (%)
A2	1	59,03	60,81	24	2,48	2,48	2,40
	2	73,96	76,05	30	2,46		
	3	80,26	82,96	32	2,50		
B2	1	55,36	57,26	23	2,40	2,38	3,34
	2	61,45	63,52	26	2,36		
	3	76,75	79,23	32	2,39		
C2	1	56,25	57,75	22	2,55	2,56	2,49
	2	75,14	77,06	29	2,59		
	3	71,54	73,15	28	2,55		

Tableau 26

Détermination de la masse spécifique, porosité totale et fermée de roches altérées.

ech	N°	Md+e (g)	Md+e+ech (g)	V (cm ³)	ρ_{sp} (g/ cm ³)	ρ_{sp} moy (g/ cm ³)	P_{to} (%)	P_{fe} (%)
A2	1	90,71	104,41	5	2,73	2,74	09.31	7.47
	2	90,75	104,44	5	2,73			
	3	90,78	104,51	5	2,74			
B2	1	90,74	104,28	5	2,70	2.70	11.51	8.16
	2	90,73	104,25	5	2,70			
	3	90,79	104,25	5	2,69			
C2	1	90,63	104,66	5	2,80	2.80	8.20	5.71
	2	90,71	104,68	5	2,79			
	3	90,79	104,76	5	2,79			

ملخص

إن تآكل الأحجار المستعملة كمواد بناء هو ظاهرة ناتجة عن عدة عوامل من بينها العوامل الطبيعية والخصائص التركيبية و البنيوية لهاته الأحجار وإمكانية مقاومتها لهاته العوامل. إن ترميم وصيانة البناءات التاريخية القديمة التي تآكلت وتأثرت بهاته العوامل يبدأ من تحديد طبيعة وخصائص الحجارة المستعملة في البناء ونوعية الضرر الذي تعاني منه هذا العمل يدخل في إطار ترميم وصيانة قصبه دلس فلهدا بدأنا:

أولاً:

دراسة نوعية وخصائص الأحجار المستعملة في بناء البيوت القديمة للقصبه واستعملنا طرق وتقنيات للوصول لهذا الغرض: التحليل المعدني بالأشعة السينية، التحليل الكيميائي ، التحليل الحراري والبيتروغرافي بالإضافة إلى الخصائص الفيزيائية والميكانيكية.الأحجار التي تم دراستها هي عبارة عن صخور رسوبية متكونة من الحجر الرملي الكلسي والحجر الرمادي البركاني.

ثانياً: دراسة نوعية التآكل الذي تعاني منه هاته الأحجار المستعملة في البناء عبر الزمن ومقارنتها بالأحجار السليمة التي لم تتآكل ، ولاحظنا من خلال هاته المقارنة أن حجر رملي كلسي تعرض إلى فقدان (ذوبان) معتبر من مادة الكلس التي تلعب دور رابط لمختلف المكونات المعدنية لهذا الحجر تحت تأثير مياه الأمطار والرطوبة المتصاعدة من الأرض عن طريق الخاصية الشعرية على خلاف الحجر الرمادي البركاني الذي يحافظ نوعاً ما على توازنه.

وأخيراً تم الخروج بنصائح وتوصيات بخصوص اختيار الحجر الأكثر ملائمة من أجل ترميم ناجح وطويل الديمومة لهذه القصبه العتيقة.

مفتاح: حجر بناء، قصبه دلس، تآكل، ترميم، تعريف.

SUMMARY

The deterioration of the stones of constructions is a real phenomenon which utilizes several inherent factors initially with the natural elements and second place with the nature of the stone and its capacity of resistance. The restoration and the repair of the historical masonries which crossed the ages by undergoing degradations, pass by an identification of the nature of the rock and pathologies which the stone presents. Our work lies within this scope and relates to the program of restoration and rehabilitation of the Casbah of Dellys. Thus we carried out the identification of the nature of the stones used in historical constructions of the masonry of the Casbah of Dellys. We used the means of investigations most adapted to achieve this first goal; analyses: DRX, petrography, thermal, and chemical, as well as the physical and mechanical characterization. The studied stones are of sedimentary nature; mainly Sandstones and of volcanic Tuff.

In the second time, we identified deteriorations which have undergoes these stones in the course of time by comparison with the healthy stones, and thus we noted that the sandstones undergo a significant loss of their calcareous cement under the rising moisture and weather action whereas Tuff keeps certain stability. Recommendations are proposed for a better restoration is given.

Key words: Old Freestone, Casbah of Dellys, identification, deterioration

RESUME

L'altération des pierres des constructions est un phénomène réel qui fait intervenir plusieurs facteurs inhérents en premier lieu aux éléments naturels et second lieu à la nature de la pierre et à son pouvoir de résistance. La restauration et la réfection des bâtisses historiques qui ont traversés les âges en subissant des dégradations, passent par une identification de la nature de la roche et des pathologies que présente la pierre. Notre travail s'inscrit dans ce cadre et concerne le programme de restauration et réhabilitation de la Casbah de Dellys. C'est ainsi que nous avons procédé à l'identification de la nature des pierres utilisées dans les constructions des bâtisses historiques de la Casbah de Dellys. Nous avons utilisé les moyens d'investigation les plus appropriés pour atteindre ce premier objectif; analyses : DRX, pétrographique, thermique, et chimique, ainsi que la caractérisation physique et mécanique. Les pierres étudiées sont de nature sédimentaire; principalement des Grès et des Tuf volcanique.

Dans un deuxième temps, nous avons identifié les altérations qu'ont subit ces pierres au cours du temps par comparaison aux pierres saines, et c'est ainsi que nous avons constaté que les grès subissent une perte importante de leur ciment calcaire sous l'action des intempéries et de l'humidité montante alors que le Tuf garde une certaine stabilité.

Des recommandations sont proposées pour le choix de pierres pour la réhabilitation des bâtisses de la Casbah de Dellys, dans le but de réaliser une restauration dans le respect de la pure tradition.

Mots clefs : Pierre de taille ancienne, Casbah de Dellys, identification, altération

