



THÈSE

En vue de l'obtention du: DOCTORAT

Centre de recherche: Département de Géologie

Structure de recherche: UFR, ST4/97

Discipline: Géologie Appliquée

Spécialité: Géo-environnement

Présentée et soutenue le 09/03/2019 par

Mounia AZEROUAL

ETUDE DE L'ALTERATION DES MONUMENTS HISTORIQUES DE LA VILLE DE SALE : Cas des remparts de l'enceinte de Salé

JURY

Mohamed ZAHRAOUI	PES,	Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat,	Président
Mohamed ELWARTITI	PES,	Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat,	Rapporteur/Examineur
Bouamar BAGHDAD	PES,	IAV Hassan II, Rabat	Rapporteur/Examineur
Said CHAKIRI	PES,	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail - Kenitra,	Rapporteur/Examineur
Driss OUARHACHE	PES,	Faculté des Sciences, Dhar Mehrez, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès;	Rapporteur/Examineur
Mohamed BOUKALOUCHE	PES,	Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat,	Examineur

Année universitaire: 2018-2019

Dédicace

Je remercie ceux dont le soutien a été, depuis toujours, d'une constance remarquable : mon cher père, mon mari, mes enfants **Adam** et **Saad**,

Mes remerciements vont encore à mes frères et sœurs (**Hamid, Hachmi, Rachid, Karima, Omar, Awatif, et Aicha**) ma belle mère,, ma grande mère, ma belle mère, mon beau père, mes belle sœurs (Nadia , Asmaa, Latifa, Bouchra et Siham) ainsi que mes beau frères (Abderrahim, Hamza et Noureddine),. Ils ont vécu cette expérience de thèse à travers moi.

J'adresse mes plus sincères remerciements à Monsieur **Moussa BOUNAKHLA**, Chef de l'Unité Pollution Atmosphérique et Géochimie au CNESTEN, qui m'a accueilli dans son Unité et qui a mis à ma disposition tout le matériel et la documentation nécessaire.

Mes vifs remerciements vont aussi à Mr **Anas DOUKKALI**, ex-Professeur à la Faculté de Médecine de Rabat, pour m'avoir conseillé et encouragé pendant la période de stage au sein du CNESTEN. Ses compétences en chimie, ses conseils et ses remarques ont largement facilité ce travail.

Je remercie Monsieur **DAHCHOUR**, Directeur de l'APESA, pour m'avoir accueillie au sein de son Laboratoire. Ses encouragements et ses nombreux conseils m'ont été précieux.

Mes remerciements s'adressent également à tous ceux qui ont facilité ce travail : Monsieur **TALEB** de l'Unité de Malherbologie à l'IAV, pour son aide dans l'identification des espèces florales ; Les Directeurs et les Ingénieurs de l'Unité d'appui et de Recherche scientifique au CNRS ; et les Professeurs du Laboratoire d'Analyse chimique à l'IAV ; ainsi que les Architectes de la Direction du Patrimoine et l'Association Bou Regreg, qu'ils trouvent ici ma profonde reconnaissance.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette étude : je pense en particulier à mes amies **Nouhad Z. Meriam B., Laila F., Khawla T., Bouchra Z. et Mounia T.**

AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué dans le cadre du PROTARS II P32/II, et en étroite collaboration entre le Centre de recherche: Département de Géologie, structure de recherche: UFR, ST4/97 : discipline: Géologie Appliquée et Spécialité: Géo-environnement à la Faculté des Sciences – Université Mohammed V- Rabat et le Département du sol à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV). Ce travail a été réalisé sous la direction de Mr Mohammed El Wartiti et Mr. Mohammed Zahraoui Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et Directeur de laboratoire de géologie appliquée, et la co-direction et l'encadrement de Mr Bouamar BAGHDAD, Professeur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV).

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation :

Je remercie vivement **Mr Mohammed ZAHRAOUI**, Professeur à la Faculté des sciences de Rabat pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de ma thèse.

Je voudrais témoigner ma profonde gratitude à Monsieur **Mohammed EL WARTITI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et l'ex- Directeur de laboratoire de géologie appliquée pour son aide efficace quand au suivi scientifique de ce travail et ses précieux conseils qui m'ont encouragé, et qui a guidé ce travail avec beaucoup de bienveillance.

J'exprime ma reconnaissance très particulièrement envers Monsieur **Bouamar BAGHDAD**, Professeur à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV) et co-encadrant de cette thèse, pour m'avoir proposé ce sujet. Sa rigueur, son exigence et son sens critique m'ont beaucoup appris, tant sur le terrain qu'au laboratoire, et son soutien a été constant tout au long de ce travail.

Je remercie vivement Mr **Said CHAKIRI**, professeur à la Faculté des Sciences de Kenitra, qui me fait l'honneur de rapporter et examiner ce travail ; qu'il soit assuré de ma gratitude et mon profond respect.

Mr **Driss OUARHACHE**, professeur à la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fés, a accepté avec aimabilité rapporté et examiner mon travail. Je le prie de bien vouloir croire à mon profond respect et toute ma gratitude.

Je dois une profonde reconnaissance à Mr **Mohamed BOUKALOUCH**, professeur à la faculté des sciences de Rabat, d'avoir bien voulu examiner ce travail. Qu'il veuille croire à mes sincères remerciements.

Résumé

Les remparts de l'enceinte de Salé constituent une partie intégrante de l'histoire des civilisations qui se sont succédées dans cette ville. Le principal matériau de construction de ces anciennes remparts est la calcarénite du Plio-Quaternaire (Pierre de Salé). Cette roche se caractérise par une porosité assez élevée avec une dureté moyenne.

L'examen macroscopique de ces remparts montre une grande variété de formes d'altération: Croûtes noires, décollement d'enduit, effritement, alvéoles, fissures, prolifération des végétaux, disjoints et desquamations. Les différentes analyses (Microscope électronique à balayage, Fluorescence aux rayons X, Chromatographie ionique, Spectrométrie d'absorption atomique et Diffraction aux rayons X) effectuées sur les échantillons prélevés le long des pierres altérées de ces remparts (croûtes, alvéoles, pierres, enduits et mortiers) a permis la mise en évidence de particules polluantes (SO_4^{2-} et NO_3^-), des aérosols marins (K^+ , Na^+ et Cl^-) ainsi que les métaux lourds (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn). Ces polluants dépendent en premier lieu des facteurs intrinsèques (composition chimique et minéralogique, structure et texture) et des facteurs extrinsèques (Environnementaux, biologiques, anthropiques). L'étude du "Facteur d'enrichissement" de la pierre de Salé montre que les principaux facteurs d'altération de ces remparts sont d'origine une activité anthropique et les aérosols marins.

Mots clés: Remparts de Salé, calcarénite, Altération, Sels solubles, Pollution atmosphérique et Embruns marins.

Abstract

The ramparts of the Sale's enclosure are an integral part of the history of civilizations that have succeeded in this city, the main building material of the ancient ramparts is the calcarenite Plio-Quaternary (Sale's stone). This rock is characterized by a rather high porosity with medium hardness.

The macroscopic observations of these ramparts shows a great variety of alteration forms: black crusts, detachment of coating, crumbling, alveoli, fissures, proliferation of plants, disjoining and desquamation. The various analyzes (scanning electron microscope, X-ray fluorescence, ion chromatography, atomic absorption spectrometry and X-ray diffraction) carried out on the samples taken along the altered stones of these ramparts (crusts, alveoli, stones, coatings and mortars) has revealed polluting particles (SO₄²⁻ and NO₃⁻), marine aerosols (K⁺, Na⁺ and Cl⁻) as well as heavy metals (Pb, Cr, Ni, Cu, Zn). These pollutants depend primarily on intrinsic factors (chemical and mineralogical composition, structure and texture) and extrinsic factors (environmental, biological, anthropogenic). The study of the "enrichment factor" of the Sale's stone shows that the main factors of alteration of these ramparts are of origin an anthropic activity and marine aerosols.

Key words: Ramparts of Sale's city, calcarenite stone, Deterioration, soluble salts, air Pollution and marine Spray.

الملخص

تشتهر مدينة سلا بمجموعة من المباني التاريخية المكونة أساساً من الحجر الكلسي والتي تمثل تراثاً ثقافياً ذا قيمة عالمية مرموقة. تشكل أسوار المدينة القديمة لسلا جزءاً لا يتجزأ من تاريخ الحضارات التي توالت على هذه المدينة. أهم مكونات البناء هو الحجر الكلسي الذي يتميز بمسامية عالية وصلابة متوسطة، مع اختلاف في بعض خصائصه بحسب المكان ومستوى استخراجِه (المقالع القديمة بنواحي مدينة سلا).

تبين الملاحظة الميدانية لحجارة أسوار المدينة القديمة لسلا، أهمية عمليات تدهور بأشكال مختلفة: القشرة السوداء، انفصال الجص، تكون حويصلات، ظهور الشقوق، تكاثر النباتات. إذن مجموع الدراسات التي تم إنجازها على المواد المستخدمة في بناء الأسوار المدينة القديمة لسلا (الصخور الكلسية والجص والطلاء) جعلت من الممكن تقييم درجة تدهور الحجارَة الأثرية للمدينة القديمة لسلا وتحديد الأسباب الرئيسية لذلك. إن التحاليل المختلفة (FRX, CI, SAA, DRX) المنجزة على العينات التي المأخوذة على طول الأسوار (القشور، الحويصلات، الحجارَة، الجص والطلاء) سمحت بتحديد التركيب العياني لهذه العينات، الكشف عن وجود ملوثات جوية SO_4^{2-} و NO_3^- ، عناصر الرذاذ الجوي (Na^+ , Cl^- , K^+)، بالإضافة إلى المعادن الثقيلة (Zn , Cu , Ni , Cr , Pb). دراسة الصخرة الأثرية لسلا تؤكد بالفعل أن العناصر الناتجة عن النشاط الانساني والتأثيرات البحرية هي السبب الرئيسي لتدهورها. **الكلمات الرئيسية:** أسوار مدينة سلا، تدهور صخرة الكلس، أملاح مذابة، تلوث جوي، رذاذ بحري.

Table de matières

Avant propos

Résumé, Abstract, ملخص

Première partie :

Historique, principaux monuments et Environnement général

Introduction Générale	1
Chap. 1 : Historique de la ville de Salé et ses principaux monuments historiques	5
I- Introduction	5
II- L'histoire de la ville de Salé	5
III- Les principaux monuments historiques de Salé	6
1- Période Almoravide (1042-1147).....	6
2- Période Almohade (1145-1269).....	8
3- Période Mérinide (1215-1465).....	9
a- Medersa Abou Elhassan Mérinide	9
b- Bab Mrisa (porte du petit port).....	10
c- Remparts sud	10
d- Borj Kbir	10
e- Sour Elkouass	11
f- Bab Ferran (Bab Antar)	11
g- Fondouk Askour	12
h- Zaouïa Ennoussak (Sidi Ben Abbès)	13
i- Dar sinaa	13
4- Période Alaouite (depuis 1666).....	13
a- Fontaines	13
b- Remparts	14
c- Sqala Qdima	14
d- Sqala jdida (nouvelle sqala)	14
e- Marabout de Sidi Abdellah Ben Hassoun	15
f- Portes	16
g- Qasba des Gnaoua.....	16
IV- Conclusion	17
Chap. 2 : Environnement général de la ville de Salé.....	18
I- Introduction	18
II- environnement climatique	18
1- Température	18
2- Pression atmosphérique et régime des vents.....	18
3- Humidité atmosphérique	19
4- Régime des pluies.....	19
5- Pollution atmosphérique	20
III - Environnement géologique	20
1- Cadre géologique.....	20
a- Socle paléozoïque	21
b- Le Mésozoïque	21
c- Le Néogène.....	21
d- Le Plio- Quaternaire.....	22
d1- Le panneau du Quaternaire ancien.....	22
d2- La bande du Quaternaire moyen.....	24
d3- la bande littorale d'âge Harounien – Ouljien- Soltanien.....	24
d4- la bande littorale actuelle.....	24

2- Géomorphologie de la région de Salé.....	25
3- Aspect pédologique des formations superficielles de la région étudiée	25
4- Cadre géotechnique des formations quaternaires	26
a- Carrière Hay Rahma.....	27
b- Carrière El Brahma	28
c- Carrière Bouknadel	28
5-Tectonique de la région de Rabat-Salé	29
IV- L'hydrologie de la région de Salé	29
V- La sismicité	30
1- Provinces sismotectoniques du Maroc.....	30
2- Sismicité historique de la ville de Salé	30

Deuxième partie :

L'enceinte de la médina de Salé : identification, système structural et pathologies de dégradation

Chap. 3 : L'enceinte de la médina de Salé : identification, système structural et matériaux de construction	33
I- Introduction	33
II- Identification de l'enceinte de la médina de Salé	33
III- Le Système structural de l'enceinte.....	35
1- Les murailles	35
2- Les Borjs	36
a-Borj el klab	36
b-Borj el Mdouar	36
c- Borj Eddoumouh (sqala qdima).....	37
3- Les portes (Bab)	37
a- Bab Mrisa	38
b- Bab Jdid.....	39
IV- Matériaux de construction de l'enceinte.....	39
1- Pierre de taille.....	40
2- Moellons	43
3- Briques	44
4-Bois	44
5- Mortier	44
V- Conclusion	45
Chap. 4 : Symptômes et causes de dégradations des remparts de l'enceinte de Salé	46
I- Introduction	46
II- Les symptômes de dégradation des monuments historiques.....	46
1- Les patines.....	47
2- les altérations physiques	47
a- Les ravinements	47
b- Les fissures	48
c- Les plaques	48
3- Les altérations chimiques.....	48
a- Les dissolutions	48
b- Les désagréations sableuses	49
c- Les encroûtements	50
4- Les altérations biologiques.....	51
a- Les arbres et plantes.....	51
b- Algues, champignons et lichens	52

III- Pathologies de dégradation observées sur l'enceinte de Salé et relevées floristiques.....	52
1-Aspect des formes de dégradation sur l'enceinte de Salé	53
a- Les croûtes.....	53
b- Les tâches d'humidité et les zones blanchâtres	54
c- Les fissures	55
d- L'alvéolisation.....	56
e- L'érosion ou désagrégation sableuse	56
f- Desquamations ou décollement en plaques	57
g- Les restaurations inadaptées.....	57
h- La végétation	59
2- Relevés floristiques sur le terrain	62
a- Méthodologie.....	63
b- Résultats et caractérisation de la flore récoltée	63
3- Conclusion	67
IV- Les causes générales de dégradation des monuments historiques	68
1-Facteurs naturelles	68
a- Action de l'eau.....	68
b- Action éolienne.....	70
c- Action de la température	70
2- Facteurs biologiques	70
a- Végétaux supérieurs.....	71
b- Les algues.....	72
c- Les champignons	73
d- Les lichens.....	73
e- La faune.....	74
f- Les bactéries.....	75
3- Facteurs humains	76
a- Restaurations inadaptées	76
b- Action des facteurs mécaniques	77
c- Action des charges	77
c-1 Sens de pose de la pierre	77
c-2 Jointoiement des blocs.....	77
d- La Pollution atmosphérique	78
V- Conclusion	81

Troisième partie :

Etudes géotechniques ; Essais de vieillissement et Analyses chimiques

Chap. 5: Etude du matériel pierreux par essais géotechniques et essais de vieillissement	82
I- Introduction	83
II- Caractéristiques pétrographiques de la roche saine et de la roche altérée	83
1- Roche saine	84
2- Roche altérée	85
III- Essais géotechniques et essais de vieillissement.....	87
1- Introduction	87
2- Techniques employées.....	87
a- Fluorescence aux rayons X (FRX).....	88
b- Microscope électronique à Balayage (MEB)	88
c- Chromatographie ionique (CI).....	89
d- Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).....	90
e- Diffraction aux Rayons X (DRX).....	90

3- Etude des propriétés géotechniques des matériaux sains et altérés.....	91
a- Protocoles et résultats des essais géotechniques.....	91
a1- La masse volumique apparente	92
a2- La porosité et la masse volumique absolue	92
a3- Résistance à la compression	93
a4- Capillarité	94
b- Discussions des résultats des essais géotechniques	95
4- Les essais de vieillissement.....	96
a- Etude des caractéristiques générales des lithotypes étudiés.....	96
b- Protocole expérimental	98
b1- Essai de cristallisation des sels	98
b2- Essai de corrosion par les acides.....	99
c- Résultats et Discussions	99
IV- Conclusion	105

Quatrième partie :

Analyses chimiques et facteurs d'enrichissement

Chp.6 : Analyses chimiques des produits d'altération, des pierres et des enduits	108
I- Introduction	108
II -Analyse chimique des matériaux sains et altérés.....	108
1- Echantillonnage et Méthodes	108
2- Définition des sels solubles et des métaux lourds	110
a- Les nitrates.....	110
b- Les sulfates	110
c- Les chlorures.....	111
d- Le Sodium	111
e- Le Potassium.....	112
2- Les métaux lourds.....	112
III- Résultats et interprétation des analyses chimiques	112
1- Observations par MEB-EDX	112
2 Analyses par FRX	116
3- Analyse par CI.....	116
4- Analyses par SAA	122
5- Analyses par DRX	122
IV- Les facteurs d'enrichissement.....	124
1- Introduction	124
2- Principe	124
3- Résultats des facteurs d'enrichissement	125
a- Facteur d'enrichissement des croûtes noires par rapport à la pierre de Salé.....	125
b- Facteur d'enrichissement des croûtes noires par rapport à l'eau de mer	127
c- Facteur d'enrichissement des croûtes noires et des alvéoles par rapport à la poussière du sol.....	128
V- Conclusion	129
CONCLUSION GENERALE.....	133
Liste des figures	137
Liste des Tableaux.....	139
Liste des photos.....	141
Références Bibliographique	142
Annexe	149

Introduction Générale

La ville de Salé, construite sur la rive droite de l'embouchure de l'oued Bou Regreg au NW du Maroc (Fig. 1), est aussi un environnement naturel, riche et diversifié ; c'est une ville côtière avec des forêts de chêne liège, des nappes phréatiques importantes réparties dans le plateau de la Maâmora, des carrières d'exploitation des calcaires gréseux et des marnes argileuses, avec un climat méditerranéen sub-humide. Elle est limitée du côté ouest par l'Océan Atlantique, au Sud par l'oued Bou Regreg ; à l'Est et au nord par deux axes routiers importants liant la ville de Salé aux autres villes du Maroc.



Fig. 1. Situation géographique de la ville de Salé

Son sous-sol géologique lui procure d'excellents matériaux pour l'édification de ses maisons et ses remparts : pierres en provenance des calcaires gréseux dunaires du Plio-Quaternaire, argiles des couches du Vindobonien qui affleurent au niveau des petites vallées perpendiculaires à l'oued Bou Regreg, cailloutis

dérivés d'érosion des couches du Villafranchien, et sables pour compléter le riche éventail d'une nature généreuse au service de l'homme.

La médina de Salé, perle de la civilisation islamique, est édifiée au XI^{ème} siècle par les Banou Achara. Les différentes dynasties ayant gouverné le Maroc ont énormément participé à son évolution. L'histoire de la ville est très riche, et témoigne d'un passé prestigieux. Chaque dynastie y a laissé des traces plus ou moins nombreuses de ses édifices et plusieurs mosquées y ont été édifiées au cours des siècles.

La ville de Salé dispose d'un héritage culturel universel qui retrace son histoire par les édifices architecturaux sous formes diverses : murailles, borjs, portes monumentales, medersa, mosquées, zaouias. Actuellement, cette richesse souffre de dégâts irréversibles qui se manifestent sous formes d'alvéoles, de décoloration, de décollement d'enduit, des encroûtements, des fissures.

Le présent travail vise à mettre au point une méthodologie pour l'étude des matériaux de construction traditionnels, et d'étudier les causes responsables des formes d'altération observées sur les monuments historiques de la ville de Salé. A cette fin, plusieurs essais ont été entamés (essais géotechniques et essais de vieillissement) ; pour l'analyse microstructurale et chimique, plusieurs techniques d'analyses ont été utilisées (loupe binoculaire, Microscope électronique à balayage, diffraction aux rayons X, fluorescence aux rayons X, chromatographie ionique et spectrométrie d'absorption atomique). Ce travail est réparti en trois parties :

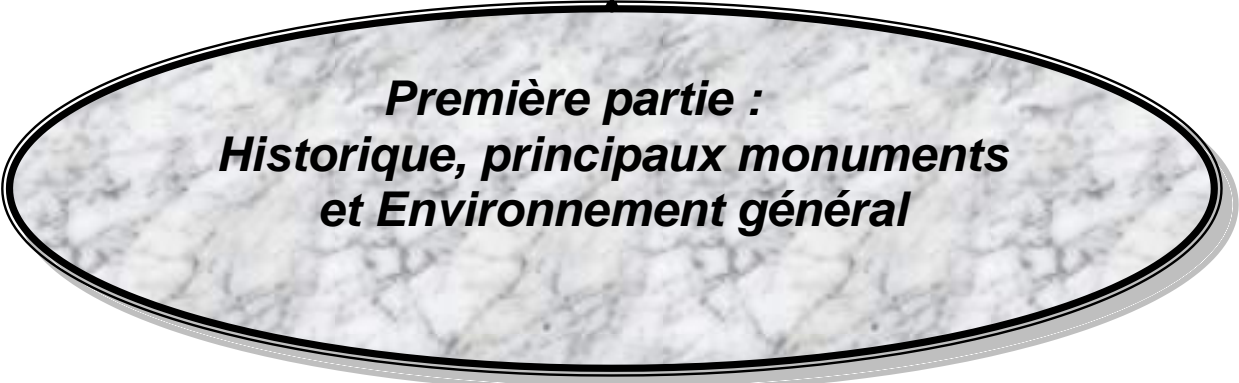
- Dans la première partie nous allons présenter un brève historique de la ville de Salé et de ses principaux monuments. Nous présenterons également les différentes données concernant l'environnement de la médina de Salé, à savoir les caractères géologiques, géomorphologiques, climatiques, et la sismicité de la région.

- Dans la deuxième partie, on va essayer d'identifier le système structural et les matériaux employés dans la construction de l'enceinte de la médina de Salé ; et

d'étudier l'état des remparts de la médina de Salé en décrivant les formes de dégradations les plus développées, et par la suite, déterminer les facteurs responsables de ces dégradations.

- Ensuite, dans la troisième partie, nous présentons les essais géotechniques et les essais de vieillissement artificiels sur des pierres de carrières qui ont été effectués afin d'étudier la compatibilité entre les roches altérées et les roches de substitution et de remplacement. Nous avons effectués également des analyses au laboratoire des produits d'altération (croûtes noires, alvéoles) et des matériaux anciens (pierres, mortiers et enduits). Les résultats de ces essais et de ces analyses ont permis de définir les principales causes intervenant dans la dégradation des remparts de l'enceinte de Salé, ainsi que, l'étude de la compatibilité entre les matériaux utilisés dans les opérations de restaurations et les matériaux d'origine.

- Enfin, la synthèse des principaux résultats de ce travail sera présentée en conclusion.



***Première partie :
Historique, principaux monuments
et Environnement général***

Chap. 1 : Historique de la ville de Salé et ses principaux monuments historiques

I- Introduction

La ville de Salé possède à l'instar de nombreuses villes du Maroc, une histoire très riche. Les Banou Achara, les Almohades, les Almoravides, les Mérinides et aussi les pirates Andalous se sont succédés dans cette cité située en bordure nord de l'estuaire du Bou Regreg. Les monuments historiques édifiés par ces dynasties sont un témoignage de leur histoire, de leur civilisation, de leur art et de leur science, ce qui nous a incité à présenter un brève résumé de l'histoire de la ville et de ses monuments.

II- L'histoire de la ville de Salé

La ville de Salé a été construite par les Banou Achara au XI^{ème} siècle, ils avaient édifié sur la rive droite du Bou Regreg un palais qui a disparu actuellement et n'en reste pas de traces, et la Grande Mosquée. Après une période prestigieuse grâce au commerce et aux échanges établis avec les régions voisines, il semble que cette famille soit éteinte par l'arrivée au pouvoir des Almoravides. Cette dynastie a doté la ville de murailles constituant ainsi la première enceinte de la ville de Salé.

Les Almohades prirent Salé en 1145-1146, ils entreprennent de grands travaux d'alimentation en eau dont le canal principal passe au dessus de Sour Kouass à la sortie nord de la ville de Salé, et ils restaurent la Grande Mosquée. Durant la période Almohade, Salé représentait un centre et une base guerrière qui s'ouvrent sur l'Afrique du Nord et l'Andalous en Espagne. Elle a connu une nette extension marquée par la construction de l'enceinte de Salé qui est faite toute entière de moellons.

A cette époque, Salé recevait des contingents étrangers qui viennent accroître sa population : des Berbères d'Algérie et de Tunisie ainsi que des Andalous.

Au XIII^{ème} siècle, la ville de Salé devient un champ de lutte entre les Almohades et les Mérinides. Elle fait, aussi, l'objet d'une occupation par l'escadre d'Alphonse X en septembre 1260. Cette occupation, contre laquelle le Sultan Mérinide Yacoub ben Abdelhaq lutta énergiquement, n'a pas épargné la ville qui fut saccagée par les chrétiens avant leur retrait. Suite à cet événement, Yacoub ben Abdelhaq décida de doter la ville d'un dispositif défensif en ordonnant la construction d'une muraille du côté de la mer, et en implantant un port fortifié. Salé connaît, durant cette période, une réelle prospérité commerciale et agricole (UNESCO, 1999).

Au XIV^{ème} siècle, une Medersa est construite en même temps qu'un aqueduc qui se prolonge depuis Ain Berka pour une alimentation régulière en eau. C'est à la même période que furent édifiés l'actuel fondouk Askour et la zaouïa Ennoussak.

Au XVII^{ème} siècle, Moulay Ismail construisit Qasbat Gnaoua et la ville fut fortifiée par ses successeurs. Les remparts furent restaurés, une poudrière non loin de la porte de Sidi Bouhaja est élevée ainsi qu'une Scala en guise de la protection du fleuve Bou Regreg.

Au XVIII^{ème} siècle, sidi Mohammed Ben Abdellah restaure l'arsenal en 1765. Le choix d'Essaouira comme port principal porte un coup dur à Salé qui est relégué à un degré d'importance moindre (Korbendeau, 1999).

III- Les principaux monuments historiques de Salé

Les monuments historiques de Salé sont en nombre important, certains sont classés par l'inspection des monuments historiques (Tab.1.1). Ils représentent toutes les périodes de son histoire (Tab.1.2). On va citer les principaux monuments selon l'ordre chronologique de leur construction :

1- Période Almoravide (1042-1147)

Au XII^{ème} siècle, la première enceinte était édifiée par les almoravides sous forme de murailles qui entouraient la ville entière.

- Aqueduc (Sour Elkouas)
- Bab Bouhaja (n'existe plus)
- Bab Chaâfa
- Bab Jamaa Bel Abbès
- Bab Antar
- Bab Fès
- Bab Mâalka
- Bab Mrisa
- Bab Sebta
- Bab Jdid
- Borj El kebir (angle sud-ouest du rempart sidi ben achir).
- Borj Mellah
- Borj El Qdim
- Carrières d'El Gourna (site)
- Embouchure du Bou Regreg (site)
- Enceinte de Salé
- Fondouk Askour (Façade).
- Qasba Gnaoua
- Kissaria (31 boutiques)
- Littoral au nord du Salé (site)
- Marabout de Sidi Moussa
- Medersa Mérinide
- Médina (règlement de voirie)
- Minerat Bou Bouramda
- Zone d'extension de Salé (règlement de voirie)
- Zone de protection à l'intérieur des remparts
- Zone de protection à l'extérieur des remparts
- Zone de protection le long des remparts
- Zone de protection autour des ruines de la Zaouïa de Sidi Bel Abbès.

Tab.1.1. Liste des monuments historiques et des sites classés selon la Direction de culture

Epoques	Edifices
Almoravides (1042-1147)	-Murailles de la ville
Almohades (1145-1269)	-Grande Mosquée -Remparts nord et est
Mérinides (1215-1465)	-Rempart sud -Borj Eddoumouh -Sour El Kouass -Medersa Talaa -Bab Mrisa -Bab Dar Sinaa (Bab Antar) -Fondouk Askour -Zaouia Ennoussak
Alaouites (depuis 1666)	-Fontaines: *F. Bab Hssein *F.de Zenata *F. de Medersa Talaa *F. Sidi Ahmed Hajji -Restaurations des Remparts -Grande Scala -Marabout de Sidi Abdellah Ben Hassoun -Marabout et Mosquée de Sidi Ahmed Hajji -Portes : *Bab Jdid *Bab Chaâfa -Qasba Gnaoua

Tab.1.2. Principaux monuments classés selon l'époque d'édification

2- Période Almohade (1145-1269)

Durant cette période, la Grande Mosquée, la première qui a été construite par Banou Achara en 1029 dans le quartier Talaâ, elle a été rénovée, agrandie et doté d'un minaret majestueux à la fin du XII^{ème} siècle (1196) par Yacoub El

Mansour. Dans la même année, ce Sultan a ordonné la construction des remparts nord et sud-est, après la destruction de l'enceinte sous l'ordre de Abdelmoumen en 1147.

3- Période Mérinide (1215-1465)

La période mérinide (XIII^{ème}- XIV^{ème} siècle) était marquée par la construction des chefs-d'œuvre architecturaux remarquables :

a- Medersa Abou Elhassan Mérinide

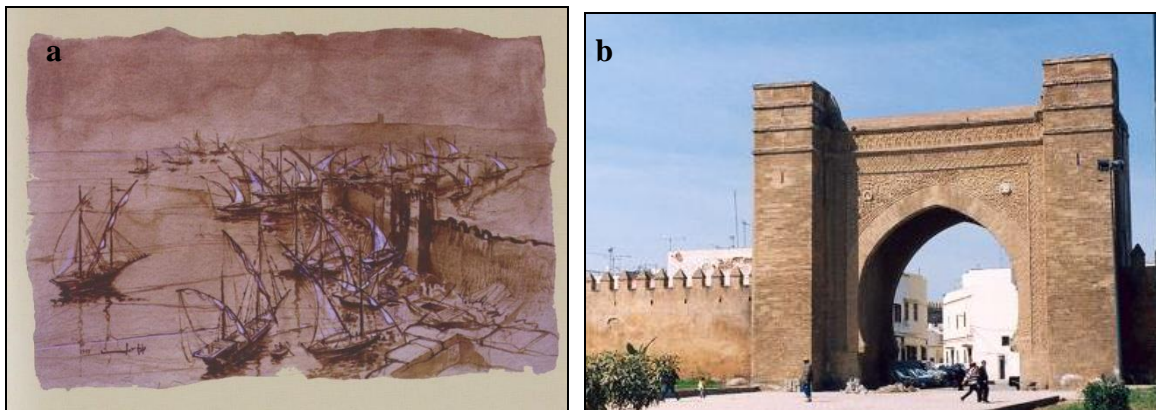
Les medersas constituaient des institutions socioculturelles, sorte de cité universitaire où vivent étudiants et professeurs. Cette medersa est fondée par Abou Elhassan, elle a été achevée en 1342 d'après une inscription dans le mur de la galerie occidentale de la cour. C'est une des merveilles de l'art mérinide par son décor et ses proportions. Sa porte forme une baie en arc outrepassé surmontée d'un auvent en bois sculpté (Barby *et al*, 1994). Plusieurs restaurations ont été effectuées sur la bâtisse, ainsi que sur le système décoratif (El Aouene, 1983 ; Terrasses, 1927).



Ph.1.1 La porte monumentale et le patio de la medersa Mérinide

b- Bab Mrisa (porte du petit port)

C'est la porte maritime du XIV^{ème} siècle unique par sa fonction (photo.1.2). Elle est située sur la face orientale des murailles de Salé. Elle laissait passer un canal reliant Salé à l'oued Bou Regreg. Elle s'ouvre actuellement sur le nouveau mellah installé en cet endroit depuis le début de XIV^{ème} siècle. Imposante et originelle, elle a la forme d'un immense arc en fer à cheval encadré d'une bande décorative et une longue inscription coufique. Deux tours en faible sailli surmontées de quatre bandeaux décoratifs flanquant la vaste ouverture. La façade a été restaurée en 1996 par l'inspection des monuments historiques.



Ph.1.2 Façade extérieure de Bab Mrisa au XIV^{ème} siècle (a) et actuellement (b)

c- Remparts sud

Ils sont situés en face de Bou Regreg, construits par Yacoub ben Abdelhaq, l'absence de ces remparts avait permis aux espagnols d'occuper Salé par surprise.

d- Borj Kbir

Ce bastion est construit au XV^{ème} siècle par le Sultan Yacoub Ben Abdelhaq. C'est un donjon gigantesque qui compléta le système de défense du côté du fleuve (photo.1.3), Mohammed Ben Abdellah le truffa de canons en bronze et d'armements turcs. Actuellement, le borj est connu par le nom de Borj sidi Ben Achir. Il a été restauré et aménagé en musée régional de la céramique en 1996 (Alaoui et Mrini, 1997) et actuellement en musée des armes.



Ph.1.3 Borj Sidi Ben Achir (

e-Sour Elkouass

Cet aqueduc a été construit pour fournir à la mosquée Talâa et à la medersa l'eau nécessaire aux ablutions. Cette eau était amenée de Aïn Berka à quelques kilomètres au nord-est de la ville.

f-Bab Ferran (Bab Antar)

C'est une porte maritime de grande hauteur constituée de pierres de taille de grandes dimensions. Elle était appelée aussi Bab Mrisa et donnait accès à Dar Sinaa. Aujourd'hui, elle est ruinée et fermée par un mur nouvellement construit (photo.1.4).



Ph.1.4 Façade extérieure de Bab Antar

g- Fondouk Askour

Il était à l'origine un ancien petit hôpital, puis, une école de médecine. Il a été construit par Abou Inan vers le milieu du XVI^{ème} siècle. Il présente un modeste bâtiment à un étage (El Aouene, 1983). Il sert actuellement de Mahkama de Cadi (tribunal).

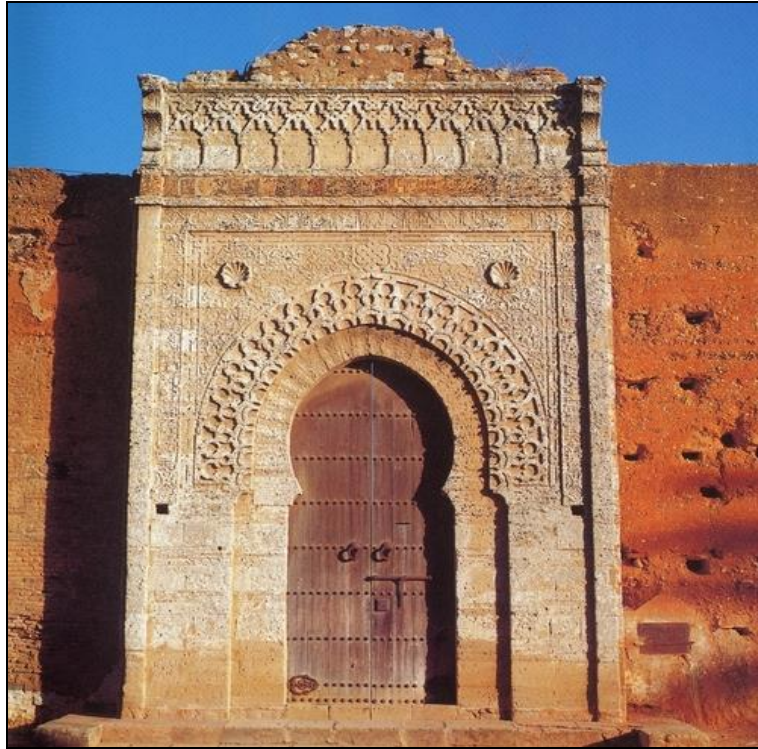
Sa porte est dotée d'un auvent à stalactites d'un travail remarquable. Les faïences placées au-dessus de la porte nécessitent une restauration urgente (photo.1.5).



Ph.1.5 Porte de Fondouk Askour transformé actuellement en Tribunal

h- Zaouïa Ennoussak (Sidi Ben Abbès)

Elle a été fondée sous le règne du Sultan Abou Inan en 1356. Elle comprenait une mosquée, des chambres et des bains pour les voyageurs pauvres (Barby *et al.*, 1994). Actuellement elle est toute ruinée, il n'en reste qu'une porte du style mérinide sculpté (photo.1.6). Cette porte doit faire l'objet d'une restauration.



Ph.1.6 Porte de Zaouïa Ennoussak

i- Dar sinaa

Il est construit par Yacoub ben Abdelhak mérinide en 1260. Il servait à l'époque à la construction des bateaux.

4- Période Alaouite (depuis 1666)

L'arrivée des Alaouites au pouvoir au XVII^{ème} siècle, a été marquée par de nouvelles constructions d'aspect sociale (Fontaines, Sqalas), mais surtout, d'aspect défensif (Qasbat Gnaoua, remparts) et qui ont été ajoutés à la richesse architecturale de Salé :

a- Fontaines

Les fontaines de Bab Hsein, de Zenata, de la medersa Talaâ et celle de sidi Ahmed Hajji sont du règne du grand roi Moulay Ismaïl. Revêtus de mosaïques

multicolores, ces fontaines ont contribué à approvisionner régulièrement la ville en eau. La plupart de ces fontaines a été remise en état en 1996 (ph.1.7).



Ph.1.7 Fontaines de Bab Hssein

b-Remparts

Ils ont été restaurés au XVIII^{ème} siècle en construisant une poudrière à côté de Bab Sidi Bouhaja (détruite vers 1961-1962 pour l'élargissement d'une rue).

c- Sqala Qdima

C'est le bastion dans la fortification Borj Eddoumoue (bastion des larmes) qui tire son nom romantique d'une histoire suivant laquelle après avoir repris Salé des espagnols, le Sultan Yacoub ben abdelhaq eut fermé la brèche par laquelle les ennemis s'étaient introduits dans la place, et pleurant les injures faites à cette terre d'Islam par les infidèles. Elle a été construite en 1759 par le Sultan Mohammed ben Abdellah (photo.1.8).

d- Sqala jdida (nouvelle sqala)

Achevée en 1847, elle fut partiellement démolie par le bombardement de Salé par les français en 1851 et fut réparée en 1852.



Ph.1.8 La Sgala Qdima

e- Marabout de Sidi Abdellah Ben Hassoun

Saint patron de Salé et de ses bateliers, sa tombe était visité jadis par ceux qui désiraient accomplir un voyage (Barby et al., 1994). Le marabout est entretenu régulièrement et de ce fait ne souffre d'aucune dégradation (Photo.1.9).



Ph.1.9 Porte de Marabout Sidi Abdellah ben Hassoun

f- Portes

-Bab Jdid : une inscription indique que la porte a été restaurée en 1243H. C'est une porte simple dont une sortie vers la mer a été fermée, l'intérieur a été restauré. Actuellement, elle est occupée par les services de la municipalité.

-Bab Chaâfa : porte très pittoresque (Photo.1.10), une légende se rapportant à cette porte suppose que sept filles y seraient enterrées après une mort collective par suicide le soir de leur mariage.



Ph.1.10 Façade extérieure de Bab Chaâfa

g- Qasba des Gnaoua

Elle a été construite par Moulay Ismaïl, distante de 2 km des remparts de la ville. Elle est située au bord de la mer, appelait aussi Qasba el-Harricha. C'est une enceinte à forme quadrilatère irrégulière, construite entièrement en pisé à l'exception des angles de chaînage qui sont construits par des pierres de taille. Elle servait de caserne et avait pour but de contribuer, au cas des flottes chrétiennes, à la défense du port Rabat-Salé. Mais, en 1738, Abdelhaq Abdelaziz Fennich la fait détruire en partie et n'en laissa subsister que l'enceinte et la mosquée (Alaoui & Mrini, 1997). Il utilisa les matériaux récupérés pour restaurer le Borj el Caïd et bâtir Borj Bab Sebta.

IV- Conclusion

De son passé prestigieux, on a constaté que dans la ville de Salé subsistent encore de nombreuses réalisations architecturales et monumentales qui traduisent l'histoire riche de la ville. Ces monuments sont les empreintes des différentes dynasties ayant gouverné le Maroc. Ils présentent des aspects variables : défensif (borjs, tours, murailles), sociale (Sqala, portes, hôpital), religieux (mosquée, medersa) avec des styles architecturaux différents.

Cette richesse et diversité en monuments historiques méritent d'être sauvegardées et conservées et exigent que des études diverses (architecturale, scientifiques, botanique, environnementale,...), doivent être faites, intéressant tous les monuments d'intérêt historique, pour sauvegarder et valoriser ce patrimoine civilisationnel.

Chap. 2 : Environnement général de la ville de Salé

I- Introduction

La ville de Salé est située au Nord de la ville de Rabat (capitale du Royaume du Maroc), sur la rive droite de l'embouchure de l'oued Bou Regreg. Elle a été construite sur des dunes consolidées calcaro-gréseuses qui appartiennent à la méséta côtière, limitée au Nord par l'oued Sebou, au Sud par l'oued Yekem, à l'Est par l'axe Rommani-kénitra et à l'Ouest par l'Océan Atlantique.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de rappeler brièvement les différentes composantes environnementales susceptibles de participer dans la détérioration des monuments historiques de la ville de Salé, à savoir :

- L'environnement climatique,
- L'environnement géologique,
- L'hydrologie de la région de Salé, et
- La sismicité.

II- environnement climatique

La situation géographique de la ville de Salé lui confère un climat méditerranéen au domaine bioclimatique sub-humide avec des variations semi-arides et humides qui présentent toutes les caractéristiques de celui du Maroc occidental où l'influence de l'Atlantique est prépondérante.

1-Température

L'influence tempérante de la masse océanique se traduit par des températures moyennes de l'ordre de 8°C pour les mois les plus froids, et de 30°C pour les mois les plus chauds. Le gel est presque inconnu. La faible amplitude thermique moyenne annuelle (19°C) révèle le caractère maritime du climat. L'ensoleillement annuel est supérieur à 8h par jour.

2-Pression atmosphérique et régime des vents

La pression atmosphérique est à l'origine du régime des vents. C'est en Janvier que la moyenne maximale est la plus élevée (766 mmhg), tandis que la moyenne

minimale (762mmhg) est en Avril et Mai. Deux périodes successives climatiques sont à mentionner, l'une sèche et l'autre humide.

Le vent souffle en été du secteur nord-ouest, faible le matin, modéré à assez fort au milieu de la journée et l'après-midi, calme la nuit. En hiver, le vent souffle généralement du Sud-Ouest modéré à assez fort (AUS, 2006).

3-Humidité atmosphérique

L'humidité atteint son maximum en hiver, elle est de 84% pour les mois les plus humides (Janvier et Décembre), et 75% pour les mois les plus secs (Juin et Septembre) (Direction d'environnement, 1980).

4-Régime des pluies

La ville de Salé, située dans la moitié nord du littoral, reçoit des précipitations assez abondantes. Soumise à une double influence continentale et océanique, la ville de Salé bénéficie d'un climat tempéré chaud. L'été, à Salé, les pluies sont moins importantes qu'elles ne le sont en hiver. La température moyenne annuelle à Salé est de 17.9 °C. Sur l'année, la précipitation moyenne est de 530 mm. Le mois le plus chaud de l'année est celui de Aout avec une température moyenne de 23.4 °C. 12.6 °C font du mois de Janvier le plus froid de l'année. La différence de précipitations entre le mois le plus sec et le mois le plus humide est de 107 mm. Entre la température la plus basse et la plus élevée de l'année, la différence est de 10.8 °C.

L'analyse des eaux de pluie collectées à différentes saisons (de Novembre 2003 à Mars 2004 à Bab Mrisa) montre un pH peu acide à basique (pH>5,8) et une présence des anions SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- et PO_4^{3-} (Azeroual et al., 2006). Généralement, l'eau de pluie est légèrement acide parce que l'air naturel contient le dioxyde de carbone qui se dissout et forme l'acide carbonique, ce qui engendre une acidité naturelle des pluies. La présence de ces anions dans l'eau de pluie confirme dans un premier temps la pollution du milieu environnant de l'enceinte de Salé, et en deuxième temps que cette eau est dangereuse lorsqu'elle s'abatte sur les murs et arrache certaines parties de roches à faible

cohésion (Lazzarini & Tabbasso, 1986), et détériore par dissolution les carbonates de calcium composant la roche monumentale.

5-Pollution atmosphérique

Actuellement, l'enceinte de la ville de Salé est sur un axe routier à trafic intense la reliant à la capitale du Maroc (Rabat) et aux autres villes du royaume (Tanger et Meknès), ce qui l'expose à une intense altération par les polluants atmosphériques. On a enregistré près des façades de l'enceinte, 450-123ppm de SO₂ et 350-131ppm de matières particulaires en suspension MPS (Tab. 2.1) (Bounakhla et al., 2003). Ces valeurs sont considérées suffisantes pour induire une attaque chimique de pierres monumentales (Villegas, 1995). Ce facteur de dégradation (pollution atmosphérique) s'ajoute également à d'autres facteurs liés surtout à la position géographique (proximité de la mer et de l'Oued Bou Regreg); et l'humidité atmosphérique.

	NO _x µg/m ³	SO ₂ µg/m ³	MPS µg/m ³	Pb µg/m ³	Cd µg/m ³
El Oulja (C.I)	246	450	350.9	3.1	0.03
Bab Bouhaja	81	123	131.7	0.9	0.031
Bab Mrisa	166	280	223.3	2.8	0.044
Normes (OMS)	40	80	75	2	0.04

Tab. 2.1. Valeurs mesurées des polluants atmosphériques à la ville de Salé. (C.I : Complexe industriel) (Bounakhla et al., 2003).

III - Environnement géologique

1- Cadre géologique

La région Rabat-Salé présente la bande côtière de la Méséta atlantique. C'est la région de contact entre la méséta atlantique, surface d'aplanissement recoupant les séries de schistes et de quartzites paléozoïques et la bordure méridionale du sillon sud rifain. Elle est couverte par des formations subtabulaires néogènes qui ont subi des mouvements tardifs d'effondrement de l'orogénèse alpine (Aberkan, 1989). Ces formations reposent en discordance sur un socle paléozoïque fortement tectonisé pendant l'orogénèse hercynienne (Fig.2.1).

a- Socle paléozoïque

Il est mis à nu par le creusement des lits des cours d'eau, il affleure surtout au fond des vallées (oueds : Grou, Korifla, Ykem, Bou Regreg et Akrech). La série stratigraphique est constituée principalement par un certain nombre de termes schisteux, grés-quartzitiques et calcaires qui s'étendent du Cambro-ordovicien au Viséen, injectés d'un granite dévonien et de filons doléritiques intra-ordoviens caractéristiques de la Méséta côtière.

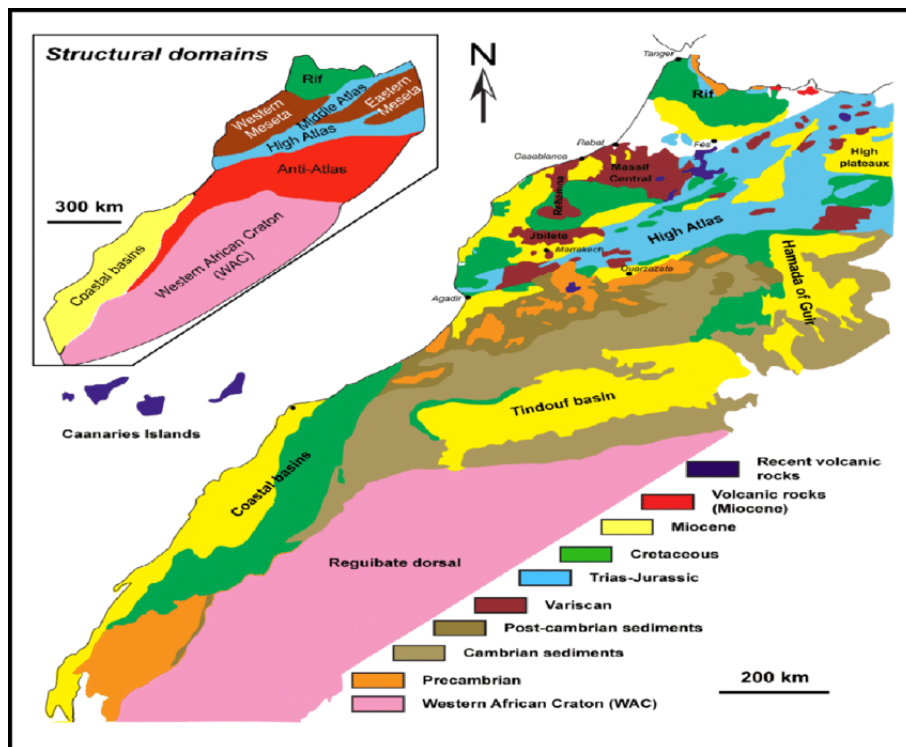


Fig. 2.1. Carte des domaines géologiques du Maroc.

b- Le Mésozoïque

Il correspond à une lacune de sédimentation caractéristique de la Méséta côtière nord occidentale.

c- Le Néogène

Les formations du Néogène reposent en discordance majeure sur le socle paléozoïque. Elles affleurent dans l'oued Bou Regreg et l'oued Akrech (Cogney, 1952). Ces formations présentent un faciès marin homogène du Miocène terminal (Messinien) constitué généralement de marnes et dont l'épaisseur croît

énormément vers le Rharb où elles atteignent presque 2000 m ; alors que vers la région d'Akrech, ces marnes tendent à disparaître (Bouyahyaoui, 1996).

Sur ces formations marneuses repose une barre constituée de lumachelle gréseuse avec des lits conglomératiques formant une corniche dure appelée « dalle moghrébienne » (Wernli, 1977). Vient ensuite un dépôt de sables et cailloutis mal consolidés qui correspond à un ancien estuaire de l'oued Bou-Regreg, datant la régression du Pliocène.

d- Le Plio- Quaternaire

Il est représenté par quatre bandes présentées par des formations dunaires marines et continentales (Fig.2.2).

d1- Le panneau du Quaternaire ancien

Il s'étend à environ 8-10km de la côte au Sud de l'oued Bou Regreg et à une vingtaine de kilomètre au Nord de Bouknadel avec une altitude de 40 à 110 m. Il regroupe les plateaux de Salé–Blad Dandoune et de Témara–Skhirat, qui s'interrompent vers l'Ouest sur un accident tectonique parallèle à la côte, de la station électrique de Salé au Nord jusqu'au village d'Aïn Attiq au sud de Témara. Ces plateaux correspondent à deux sédiments transgressifs marins superposés : Le Messaoudien et le Maarifien. Le tout est coiffé par des dunes essentiellement biodétritiques (Laouina et al., 1994).

La coupe de la côte 62m (carrière de la briqueterie de Salé, coïncidant avec le quatrième cordon littoral) montre au dessus d'une puissante série de marnes mio-pliocènes, des sédiments marins attribués au Messaoudien à structure lenticulaire constitué de conglomérats et de grès horizontaux fortement lapiazés. Au dessus, il s'est développé un sol rouge et une dalle rose, d'une épaisseur de 30 à 50cm. Cet ensemble est recouvert par une argile lagunaire, puis des crêtes de grès constitués d'un faciès lumachellique marin, attribué au Maarifien (Laouina et al., 1994). Ce dernier a été soumis à une profonde altération avant l'accumulation d'une épaisse formation rouge deltaïque contenant des bancs de galets lenticulaires (Fig.2.3).

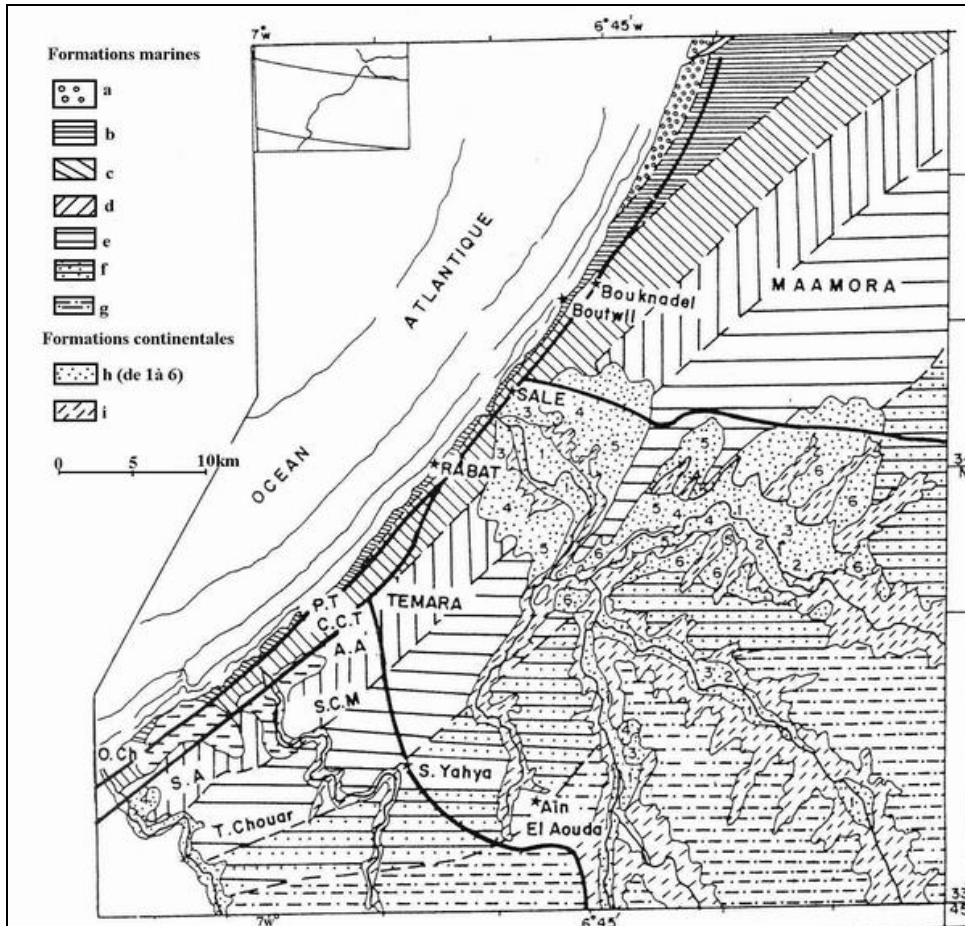


Fig.2.2 Stratigraphie des formations plio-quaternaires dans la région Rabat- Salé (Laouina, 1994) Formations marines= a: Holocène ; b: Quaternaire récent ; c: Quaternaire moyen, d: Quaternaire ancien ; e: Fouaratien ; f: Moghrébien ; g: Socle paléozoïque et couverture continentale pliocène. Formations continentales= h: Terrasses fluviales (1: Holocène ; 2: Soltanien ; 3: tensifitien ; 4: Amirien ; 5: Salétien ; 6: Moulouyen) ; i: colluvions polygéniques.

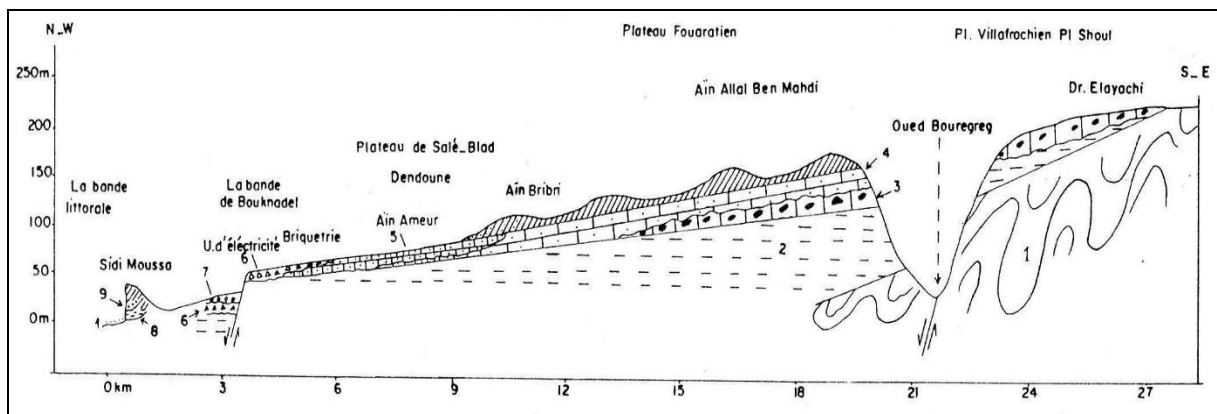


Fig.2.3 Coupe synthétique des formations plio-quaternaire de l'oued Bou Regreg à la bande littorale (Laouina et al., 1994). 1.Socle paléozoïque; 2.Marnes Messiniennes; 3.Moghrébien; 4.Lumachelle et dunes fouaratiennes ; 5.Messaoudien; 6.Maarifien transgressif et dunaire; 7.Anfatien transgressif et falaise; 8Harounien; 9.Ouljien.

d2- La bande du Quaternaire moyen

Elle correspond aux plateaux de Bouknadel-Bettana à Salé et aux plateaux s'étirant de Rabat-Agdal en direction de Témara-Skhirat ; leurs altitudes varient de 10 à 40 m. Ils s'étendent en bande étroite, limitée au SE par un escarpement de faille près de la station électrique de Salé, se poursuivent près de l'école Mohammadia d'ingénieurs, puis jusqu'à Aïn Attiq au Sud. Cette bande est limitée vers l'Ouest par la falaise ouljienne. Ces plateaux se caractérisent localement par la superposition de plusieurs générations sédimentaires marines et continentales (Taïlassane et al., 1992).

La bande commence à la base par des marnes qui contiennent les foraminifères planctoniques de type *G. Margaritae* caractéristique du Pliocène inférieur. Une série d'unités sédimentaires, débutant au Moghrébien et se poursuivant jusqu'à l'Anfatien est visible dans les coupes de Bouknadel à Salé et dans la coupe de la carrière de la cimenterie de Témara (Taïlassane et al., 1992).

d3-la bande littorale d'âge Harounien – Ouljien- Soltanien

La bande littorale correspond à un simple cordon. Elle est limitée par une falaise polyphasée au Nord de Salé (falaise de Boutwil-Sidi Moussa), mais, elle devient composite immédiatement au Sud de Rabat, où elle est constituée par une dépression étroite à partir de Dar Soltan, formant ainsi ce qu'on appelle « Oulja » (Gigout, 1956).

d4-la bande littorale actuelle

Différents sédiments holocènes, surtout sur le littoral nord de Salé s'étalent, sous forme d'une dune grisâtre, entre la plage des Nations et de Mehdia. Ils recouvrent les sédiments littoraux mellahiens qui représentent la formation du sillon interdunaire de la daya de Sidi Boughaba. Celle-ci a, peut être, fonctionné comme lagune jusqu'au dépôt de la dune grise dont la base des sédiments lagunaires a été datée de 6500BP (Reille, 1979). Une dune supérieure récente où s'intercalent des colluvions roses et grises, montre une succession d'éolianites blanches et de dépôts de ruissellement.

Cette dune est contemporaine de la construction de la dune blanche biodétritique qui est coiffée par des débris archéologiques et qui surmontent les sédiments marins mellahiens longeant la côte de Témara-Skhirat, entre la plage de Témara jusqu'à l'estuaire de l'oued Cherrat au Sud-Ouest de Rabat (Wafah, 1996).

2- Géomorphologie de la région de Salé

La région de Salé se présente sous forme d'un plateau, légèrement incliné vers l'océan, qui s'étend de Salé à bled Dendoun. Ce vaste plateau est sillonné par des Oueds venant du Massif Central : Bou-Regreg, Korifla et Grou (Beudet, 1969). Il est séparé des panneaux les plus récents par un accident tectonique parallèle à la côte. Ses altitudes varient entre 110 et 40 m. La surface du plateau est polygénique avec des matériaux du Messaoudien-Maarifien recouverts par un faciès dunaire biodétritique (Fig. 2.4). La première transgression quaternaire s'est avancée jusqu'à Ain Bribri à 110-120 m ; elle a laissé des faciès marins qui ravinent les grès fouaratien. Mais, après la régression de la mer messaoudienne, les rives du Bou-Regreg ont reçu des dépôts fluviatiles qui ont couvert le plateau de Salé, tandis que le reste du plateau connaissait une profonde altération. Sous le plateau de Salé, les dépôts superficiels recouvrent en discordance le Messaoudien, malgré la présence de profonds lapiés dans les grès (Wafah, 1996). La partie nord-ouest du plateau de Salé (plateau de Bettana) a connu une nouvelle avancée de la mer probablement au Maarifien, après un intervalle continental marqué par des puits de lapization, un sol fossilisé et une dalle rose, puis une argile lagunaire. Le faciès marin postérieur est lumachellique et les datations paléomagnétiques à la briqueterie (côte 62m) l'ont situé dans l'époque Matuyama, c'est à dire antérieurement à l'Anfatien (Wafah, 1996).

3- Aspect pédologique des formations superficielles de la région étudiée

La surface des plateaux constituant la méséta côtière se caractérise par des ondulations liées à une succession de générations de cordons et de dunes littorales qui ont commencé à s'édifier depuis le Pliocène. Ces différentes

généralisations de grés-calcaire sont surmontées par des formations sablo-argileuses rouges qui remplissent des lapiés de taille, de profondeur et de distribution spatiale variées. Le tout est enseveli sous des sables superficiels beiges qui donnent à la surface son homogénéité apparente. Celle-ci se manifeste aussi dans la végétation naturelle caractérisée par la dominance du Chêne-liège qui donne l'impression que cette région a connu les mêmes évolutions géomorphologiques et bioclimatiques (Laouina *et al.*, 1998).

Le profil pédologique suivant a été relevé dans le plateau de Salé :

*0-15cm : horizon sableux brun à structure particulière ;

*15-60 cm : horizon argilo-sableux brunâtres légèrement rougeâtre ;

*60-95 cm : horizon argileux jaunâtre à tâches grises et blanches.

Les deux caractères principaux de ce sol développé sur les formations villafranchiennes sont le lessivage et l'hydromorphie (AUS, 2006).

4- Cadre géotechnique des formations quaternaires

Dans cette partie, on va s'intéresser particulièrement aux terrains quaternaires, du fait que la majorité des matériaux utilisés dans l'édification des monuments historiques de la région Rabat-Salé ont été exploités dans ces terrains.

Les caractères géotechniques des terrains de la région étudiée sont différents d'un point à un autre. Pour donner une idée sur ces variabilités, on va prendre l'exemple de trois carrières ouvertes à l'intérieur de la ville de Salé (carrière hay Rahma, carrière El Brahma,) et à son voisinage (carrière Bouknadel).

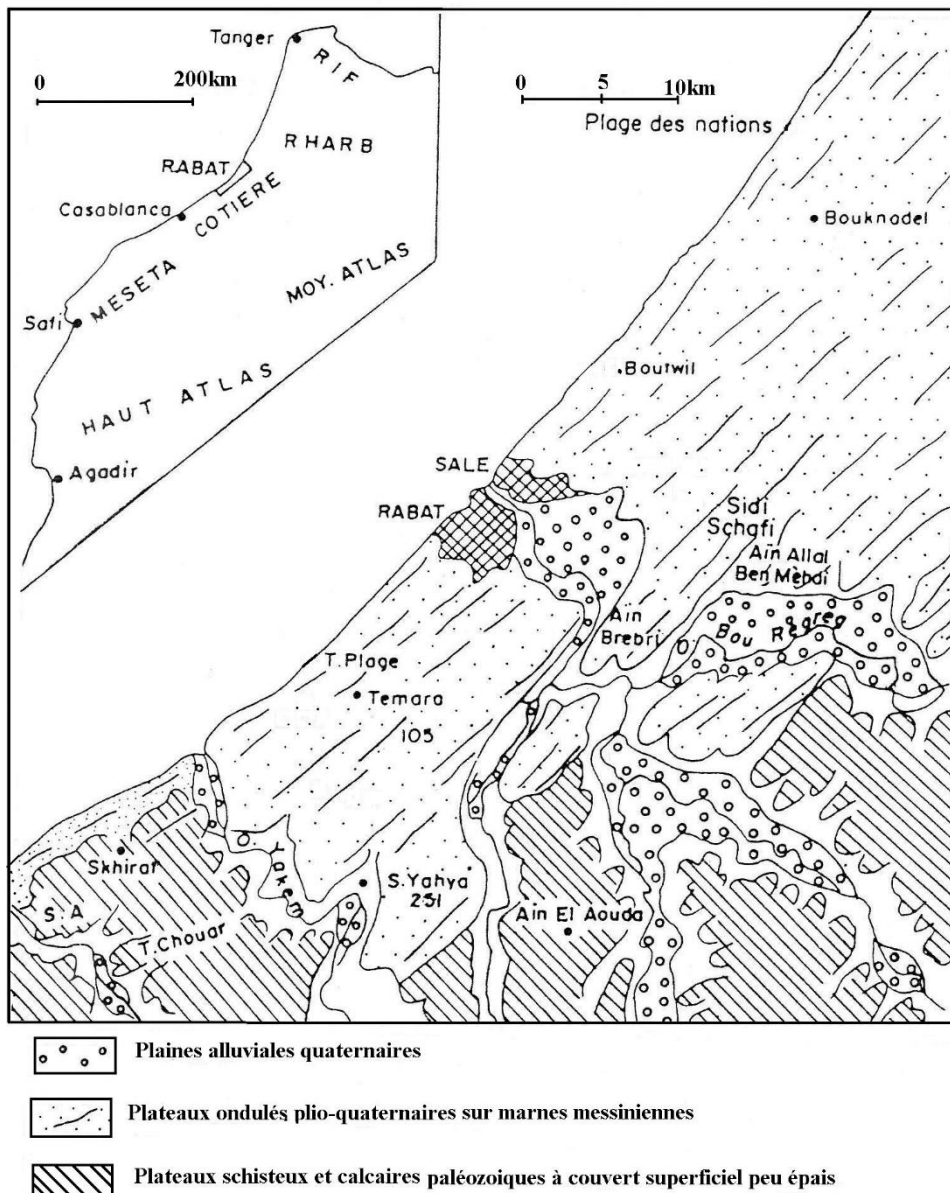


Fig.2.4 Carte géomorphologique de la région Rabat-Salé (Laouina *et al.*, 1994)

a- Carrière Hay Rahma

La carrière de Hay Rahma est formée de deux faciès, il s'agit de la calcarénite et de l'argile. La calcimétrie révèle que tous les niveaux calcarénitiques montrent une richesse importante en CaCO_3 , les niveaux rouges superficiels montrent une chute du taux de carbonates, alors que les bioclastes marins sont très importants. Ceci peut être expliqué par le faible apport des sédiments silicoclastiques, et/ou la présence d'un substratum rocheux au niveau du plateau continental,

constituant un bon support pour la prolifération des organismes à tests calcaires (Ben Boughaba, 2001).

La granulométrie montre l'abondance des sables (86% de la fraction détritique) ; selon la classification de Folk, c'est un sable bien à moyennement bien classé. L'association des minéraux lourds est subdivisée en deux types : les espèces fragiles (augite, hornblende) et les espèces résistants (épidote, andalousite, tourmaline, zircon, rutile, sphène et staurotide) (Ben Boughaba, 2001).

b- Carrière El Brahma

La calcimétrie montre une forte teneur en CaCO_3 ce qui reflète une importance des bioclastes marins et des apports silicoclastiques réduits. La granulométrie montre que les sédiments décarbonatés sont constitués de sables moyens, souvent plurimodaux (Ben Boughaba, 2001).

c- Carrière Bouknadel

Ces dépôts dunaires consolidés sont riches en bioclastes marins, sa granulométrie montre des grès fins à moyens, avec un classement ~~bien~~ bon à moyen. Leurs plurimodalités montrent de nombreuses sources d'apports détritiques.

L'association minéralogique des minéraux lourds est formée de deux types d'espèces : des minéraux lourds labiles prédominants (pyroxènes et amphiboles) et d'autres résistants relativement peu représentés (andalousite, épidote, tourmaline) (Aberkan *et al.*, 1984). La porosité varie entre 18 et 47% (Ben Boughaba, 2001).

L'étude des caractères géotechniques des faciès de la carrière de Bouknadel et de la carrière Al Brahma (tab. 2.2) a permis de constater que ces faciès sont de mauvaise qualité (Ben Boughaba, 2001).

	Al Brahma	Bouknadel
Résistance à la fragmentation	46,64 – 73,75	91,92 – 92,98
Essai de rupture (KN/cm ²)	0,08 – 0,09	0,03 – 0,06
Porosité (%)	22,39 – 30,78	45,14 – 47,29
Densité apparente (g/ cm ²)	1,52 – 1,62	1,39 – 1,47
Essai d'usure (classe 10/14)	69,45 – 74,88	89,32 – 91, 97

Tab.2.2 Les caractères géotechniques de la carrière Al Brahma et la carrière de Bouknadel.

5-Tectonique de la région de Rabat-Salé

La région de Rabat-Salé a enregistré les effets conjugués de l'eustatisme et de la tectonique. L'inégalité de la subsidence entre le Nord et le Sud de la région se manifeste et apparaît notamment durant le Quaternaire récent. Mais localement, des tendances tectoniques différenciées expliquent la variété du paysage, la variabilité des épaisseurs et la complexité des sédiments. Des panneaux ont connu un effet de soulèvement en blocs, alors que d'autres ont enregistré un basculement vers la mer (Akil, 1980). Dans les premiers, les formations successives s'étagent, comme c'est le cas sur la rive droite de Bou Regreg, où des formations reposent directement sur le Messinien. Alors que dans les seconds, l'inclinaison douce introduit des phénomènes de recouvrement et d'étagement, comme c'est le cas dans le plateau de Témara.

IV- L'hydrologie de la région de Salé

Sur le plan hydrologique, la région contient une nappe aquifère relativement importante. Cette dernière est estimée à une profondeur variant de 10 à 30m, ce qui explique le nombre important des puits dans la ville et ses alentours. Il s'agit d'une nappe superficielle, superposée à la nappe profonde, et s'étendant sur une superficie d'environ 3500 km². D'après les sondages électriques, le mur de la nappe consiste en des argiles limoneuses ayant évolué près de la surface à des

niveaux poreux et perméable constituant ainsi l'horizon aquifère de la nappe (AUS, 2006).

Des difficultés de drainage et l'ampleur de l'évaporation font que la nappe phréatique est presque partout salée avec des concentrations dépassant généralement 2g/l, et atteignant parfois 10g/l de NaCl (Bolleli, 1952).

V- La sismicité

Les séismes sont considérés comme facteurs destructeurs des monuments bâtis. Ils entraînent la rupture des maçonneries selon leurs lignes de faibles résistances sous formes de fissures qui peuvent se développer et provoquer la démolition complète du site étudié. La connaissance de l'histoire séismique de la région s'avère, donc, nécessaire.

1- Provinces sismotectoniques du Maroc

Le Maroc est subdivisé en plusieurs provinces sismotectonique ayant des comportements sismiques comparables (Bensari, 1978 et Tadili, 1998) :

- Zone rifaine et pré-rifaine connue par sa sismicité élevée ;
- Domaine atlasique de sismicité moyenne ;
- Méséta marocaine et méséta oranaise de faible sismicité ;
- Domaine de l'Anti-Atlas appartenant à la plate-forme saharienne asismique.

La ville de Salé qui fait partie de la méséta côtière, appartient, donc, à une zone de sismicité faible.

2- Sismicité historique de la ville de Salé

A partir de l'étude historique des séismes de la ville de Salé, on a noté que les données des séismes du Maroc avant le 19^{ème} siècle n'ont pas été enregistré mais juste ressentis (EL Mrabet, 1991). A partir du 19^{ème} siècle, des écrivains arabes et européens ont commencé à s'intéresser aux séismes et décrivent l'intensité des secousses et l'ampleur des dommages, leur conséquence sur la vie, mais, ces citations restent soupçonnées et insuffisantes et manquent de détails et de précisions.

Les séismes ressentis à la ville de Salé sont selon El Mrabet (1991):

- Séisme 11 Mai 1624 : le séisme a endommagé la ville avec la destruction de 2 borjs ;
- Séisme 1 Novembre 1755 : tremblement de terre important de VIII MSK ;
- Séisme 15 Avril 1757 : tremblement de terre ressenti ;
- Séisme 12 Avril 1773 : tremblement de terre ressenti ;
- Séisme 9Août 1930 : tremblement de terre de 4,7 Richter ;
- Séisme 25Novembre 1941 : tremblement de terre de VI MSK ;
- Séisme 16 Octobre 1971 : tremblement de terre de 4,5 Richter.

A partir de ces données, on peut dire qu'effectivement, la ville de Salé a connu un nombre limité de séismes surtout au 18^{ème} siècle et 20^{ème} siècle (Fig.2.5) qui ont contribué probablement à la destruction du bâti historique surtout le séisme de 1755.

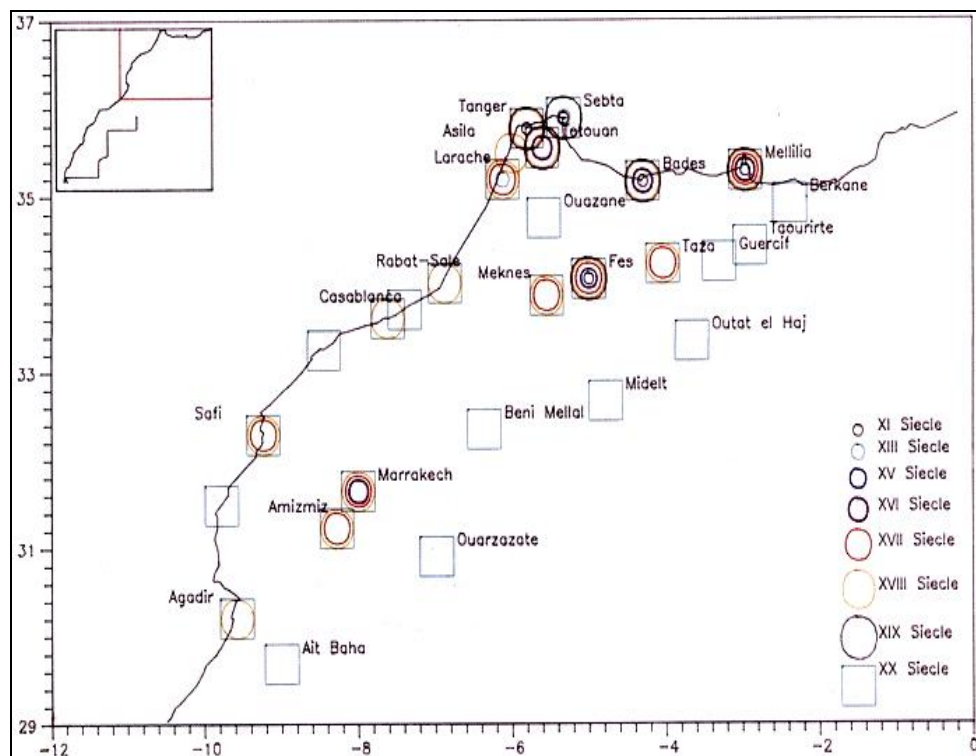


Fig.2.5 Carte de la sismicité historique du Maroc par siècle (El Mrabet, 1991)

Deuxième Partie :

**L'enceinte de la médina de Salé : identification,
système structural et pathologies de dégradation**

Chap. 3 : L'enceinte de la médina de Salé : identification, système structural et matériaux de construction

I- Introduction

Vu la richesse de la ville de Salé en édifices historiques, on a choisi de travailler sur l'enceinte de la médina afin de pouvoir établir une étude plus détaillée et bien ciblée. Ainsi, on a établi un diagnostic et une description sur le terrain de l'aspect structural de l'enceinte et de ses matériaux de construction.

L'analyse ici est réduite à une appréhension visuelle, et une analyse macroscopique. L'aspect extérieur est un paramètre important qui est pris en compte pour déterminer la nature des matériaux utilisés.

II- Identification de l'enceinte de la médina de Salé

Les plus belles protections d'une ville se sont les murailles. Leur importance, à l'échelle locale, ne se limite pas à leur valeur historique, mais surtout, à l'aspect social, tant au niveau de la sauvegarde de la médina qu'au niveau de l'aménagement de la ville entière.

Les remparts de l'enceinte de Salé s'étendent sur 4,4km et délimitent une superficie de 90 hectares (Tab.3.1). La première enceinte daterait des Almoravides au XI^{ème} siècle, mais, nous n'avons aucun document pour nous indiquer le tracé. Les Almohades auraient détruit les murailles en 542H/1147 sous l'ordre de Abdelmoumen. Les parties est et nord ont été reconstruites par Yacoub el Mansour. Ensuite, les Mérinides construisaient la muraille sud et la muraille ouest. En plus, ces murailles ont été renouvelées et/ou restaurées à différentes époques de leur histoire (de l'époque Almohades jusqu'à l'heure actuelle).

Les murailles de l'enceinte de la médina de Salé se voient parfaitement encore à l'heure actuelle sur ses quatre côtés (Fig.3.1). L'enceinte est construite toute entière en moellons, la pierre de taille n'est employée que dans les portes, les

angles de chaînage, les tours et dans les claveaux des arcs intérieurs. Le principal matériau de construction est la calcarénite coquillée calcitique du Plio-Quaternaire qui se caractérise par une porosité assez élevée et une dureté moyenne, elle est extraite des carrières avoisinantes la ville de Salé (carrières de Bouknadel).

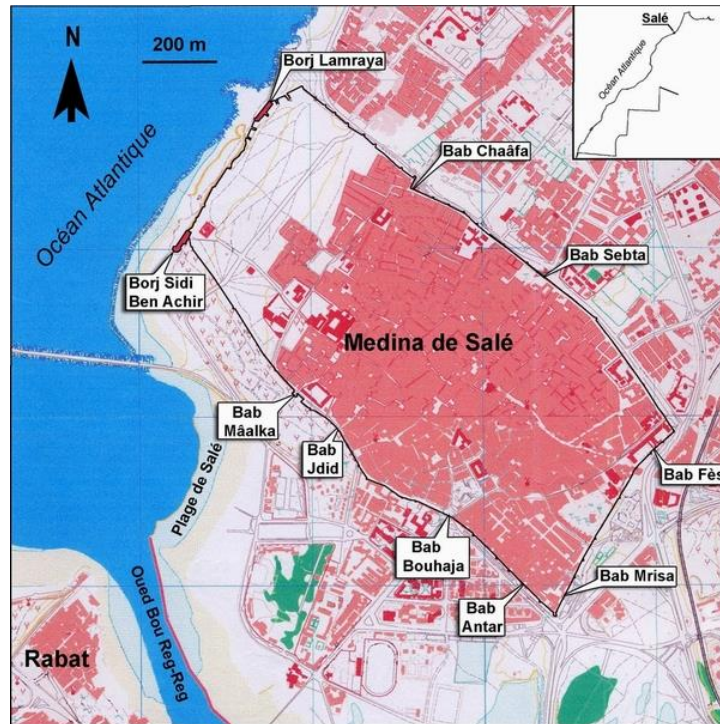


Fig.3. 1 Localisation de la médina de Salé et des différentes portes de l'enceinte.

Bab Mrisa à Bab Antar	120m
Bab Antar à Bab Bouhaja	300m
Bab Bouhaja à Bab Mâalka	310m
Bab Jdid à Bab Mâalka	250m
Bab Mâalka à Borj Sidi ben Achir	600m
Borj Sidi ben Achir à borj Eddoumouh	550m
Borj Eddoumouh à Bab Chaâfa	460m
Bab Chaâfa à Bab Sebta	450m
Bab Sebta à Borj el klab	620m
Borj el Klab à Bab Fès	160m
Bab Fès à Bab Mrisa	510m
<i>Le total des remparts de la médina</i>	<i>4330m</i>

Tab.3.1 Mesure de la longueur des remparts de la médina de Salé (Benslimane, 1992)

III- Le Système structural de l'enceinte

L'enceinte de la médina de Salé est de forme trapézoïdale, ses murailles sont flanquées de 55 tours. Les formes des tours sont généralement déterminées par les nécessités de défense. Les tours carrées coupent les courtines rectilignes. Les tours à pans coupés et les tours demi-rondes se trouvent aux angles saillants et aux endroits particulièrement menacés. Toutes les tours sont à l'extérieur de l'enceinte. Elles sont tout à fait dans la tradition de la fortification hispano-maghrébine.

La défense de Salé était assurée par les bastions (Borj). Ils sont au nombre de quatre: deux du côté de la mer (Borj el Kbir et Borj Eddoumouh); un à Bab Mrisa (Borj el Mdouar) et le dernier borj elklab (bastion des chiens) qui est le seul à être en forme de pans coupés.

1- Les murailles

Les murs de l'enceinte offrent des constitutions différentes : La base est partout encore en place. Ces murailles présentent partout le même matériau : des moellons disposés en lits presque parfaits; entre chaque lit de moellons sont alignées des petites pierres assises pour assurer une solidité à l'ensemble. Les chaînages d'angles, les emmarchements aux bases sont tous en pierres de taille disposées souvent en carreaux et boutisses en moyen et petit appareil. Le tout était liaisonné avec un excellent mortier de chaux et recouvert d'enduit blanc dont on ne trouve actuellement que des traces (face extérieure du borj sidi ben Achir). Les façades intérieures des murailles sont constituées de moellons dégrossis liés par le même mortier que celui des façades extérieures, mais, sans enduit à leur surface. L'épaisseur des murailles est de 0,80 m.

Les parements des façades sont de pierres de taille, le jointoiement renforce l'appareil des pierres par un listel riche en chaux. On a l'impression d'un appareil cloisonné.

2- Les Borjs

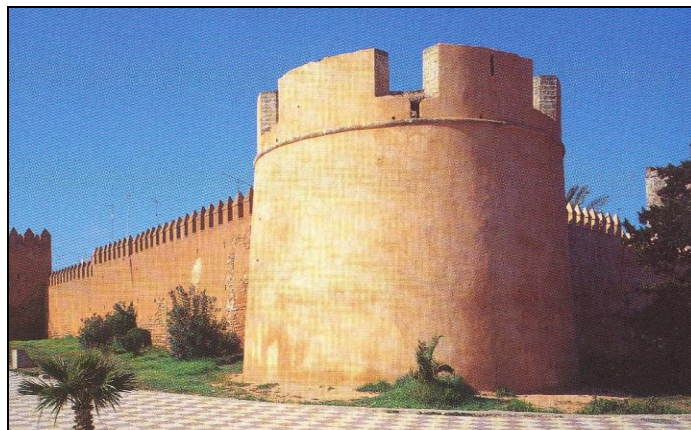
Ce sont des bastions de défense constitués de salles, la plupart du temps voûtés où l'on pouvait déposer la poudre pour les canons qui sont installés dans les meurtrières ébrasées largement vers l'intérieur, et dont l'arc est en veaux de pierres (Benslimane, 1992).

a-Borj el klab

Ce bastion permettait, par sa forme hexagonale et sa position, une surveillance permanente de toutes les arrivées à la ville. Il contrôlait la route allant vers Bab Sebta (au nord), vers Bab Fès (à l'est) et surtout la campagne environnante. Les pierres soigneusement taillées se succèdent de la base au sommet, leurs dimensions ne sont pas semblables, mais, elles donnent une impression de grande régularité. On a remarqué la réutilisation des pierres tombales sculptées.

b-Borj el Mdouar

Il se présente comme un demi-cercle relié à l'enceinte par une bâtisse rectangulaire. Les matériaux sont toujours le moellon pour les murs avec un remploi des pierres tombales en partie sculptées ; elles servent de calage. Les murs s'élevaient sur près de 6m ; les chaînages d'angles en pierres de taille, et parfois en piliers utilisés au milieu du mur (ph. 3.1). La bâtisse présente une longueur de plus de cent mètres avec des avancées de 8,05m, une autre de 12,5 m formait une pente sur laquelle s'ouvrait une porte de 4,5 m de largeur, qui menait de part et d'autres à des salles voûtées (Benslimane, 1992).



Ph.3.1 Borj El Mdouar en forme de demi-cercle

c- Borj Eddoumouh (sqala qdima)

Appelé aussi borj Lamraya, il présente un fort semi-circulaire qui s'avance dans la mer, d'une hauteur de 9m et de 8m de largeur avec un parapet dans lequel s'ouvre une série de meurtrières dirigées vers l'embouchure du fleuve. Au fond, le bastion de forme compact et lourde dresse ses murs aux moellons dégrossis et parfaitement alignés. Les chaînages d'angles sont toujours en pierres de taille. La partie la plus haute est de 9m et les deux chambres présentent quelques ouvertures en meurtrières sur leur face sud.

La porte en pierres de taille est formée par un arc plein cintre en claveaux de pierres reposant sur des pieds-droits massifs ; une colonne de part et d'autre monte jusqu'aux chapiteaux. Un entablement supérieur, non habituel dans les portes de Salé, porte un décor en rectangles successifs (Photo.3.2). Le jambage à la clé de l'arc porte un médaillon où sont inscrits la date et le nom du sultan (Benslimane, 1992).

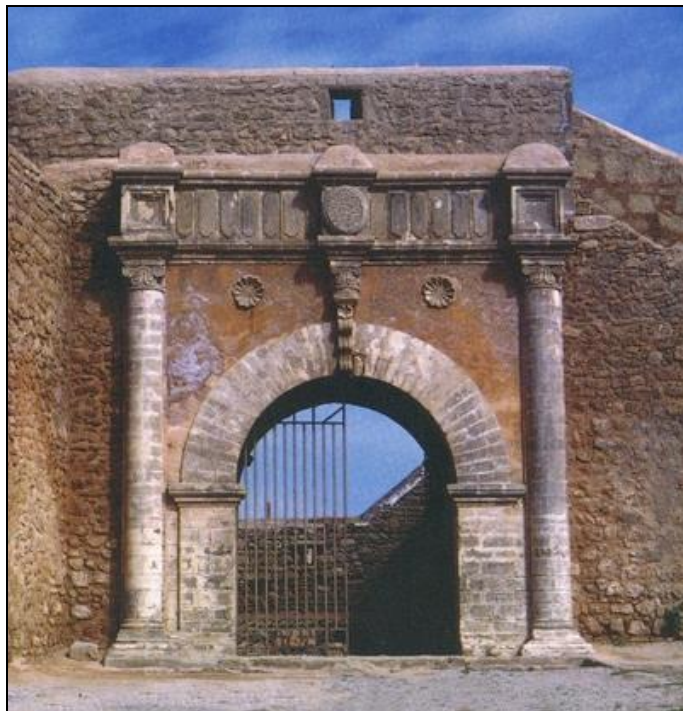


Photo.3.2 Porte sculptée de Sqala Qdima

3- Les portes (Bab)

L'enceinte de Salé était percée de plusieurs portes (Fig.3.1). Bab Bouhaja a été détruite au XVIII^{ème} siècle. La porte alaouite Bab Jdid a été ouverte dans le

rempart sud près de Bab Mâalka sur ordre royale de Moulay Abderrahman (1822-1859). Pour la description structurale, on a pris l'exemple de deux portes : la porte Mérinide Bab Mrisa et la porte Alaouite Bab Jdid.

a- Bab Mrisa

La façade extérieure de Bab Mrisa est sous forme d'un immense arc brisé en fer à cheval qui vient encadrer une bande décorative et une longue inscription coufique. Une puissante décoration végétale couvre les écoinçons de la porte. C'est un arc qui a près de 9 m d'ouverture dont le sommet se trouve encore aujourd'hui à 9,92 m.

Deux tours, en faible saillie et couronnées de quatre bandeaux décoratifs, défendent la vaste ouverture de Bab Mrisa. Étroites et hautes (3,47m x 16,80m), ces tours donnent à cette porte la particularité de dominer les murs qui l'entourent.

Plus haut, au-dessus du niveau du sommet de l'arc, s'ouvrent deux meurtrières : l'une permet de battre le mur de l'enceinte au cas où l'ennemi serait parvenu à l'occuper, une autre défend les abords immédiats de la porte avec la meurtrière frontale à axe nettement oblique, cette direction était due à la nécessité de battre un canal qui reliait l'oued au port intérieur.

Sur l'étroit palier qui précède chacune de ces chambres de défense, une vaste ouverture donne l'accès à l'intérieur de la porte, de là, on pouvait accabler de projectiles le vaisseau qui, eût réussi à s'engager sous la porte. Ces ouvrages de défense suffisent pour rendre imprenable cette porte maritime. Mais, le port s'est ensablé et vers la fin du XVIII^{ème} siècle, le mellah a été installé sur son emplacement. Le sol actuel ne laisse voir qu'une faible partie des piédroits et on n'a plus à contempler qu'un monument à demi enfoui.

La façade intérieure est marquée par l'absence de toute décoration ; il est à noter que l'arcade intérieure de la porte s'est écroulée ainsi que la voûte primitive, elle a été reconstruite de façon similaire à l'arcade extérieure (Rapport inédit, ministère de la culture 2003).

La maçonnerie du mur intérieur est réalisée à l'aide de pierres dégrossies, réunies par un blocage de petits matériaux de qualité médiocre et par un mortier de chaux et de sable. Elle a subi un décollement d'enduit et un disjointoiement. Des restaurations de Bab Mrisa ont été effectuées en 1971 et une autre en 1973. La dernière restauration s'est effectuée en 1999, mais, on n'a pas d'informations sur les travaux réalisés et les pratiques utilisées.

b- Bab Jdid

C'est une porte à coude simple de 3,17m de profondeur sur 3,88m de largeur totale. L'épaisseur des murs est de 1,25m. Elle s'intègre à la muraille à laquelle un escalier conduit au chemin de ronde. L'élévation totale est de 7m. Sur l'extérieur, sa façade est très simple : le décor est formé seulement par un chaînage d'angles visibles en pierres de taille d'égale dimension. Deux petites meurtrières de 0,50m x 0,15m lui apportent quelque éclairage. L'arc de la porte proprement dite est brisé outrepassé appareillé également en pierre; la clé de l'arc est timbrée par un médaillon ; le niveau supérieur est souligné également par une ligne de pierres de taille.

Sa façade intérieure est plus animée; des moellons forment le corps de la porte dont l'arc est souligné par un alignement de pierres; celles de base sont plus larges. Dans la partie supérieure une baie formée d'un petit arc entoure l'ouverture du milieu; deux autres meurtrières et une petite fenêtre apportent la lumière à cette partie.

NB: Il faut signaler qu'un important tremblement de terre a frappé Salé en 1755 ce qui a causé à l'enceinte plusieurs dégâts, entre autres, l'ensablement de toute la partie à côté de la rivière Bou Regreg y compris Bab Mrisa, ce qui a empêché un certain nombre de bateaux d'entrer au Port. D'autre part, Salé a été l'objet d'un bombardement de la part de l'armée française en 1763.

IV- Matériaux de construction de l'enceinte

La diversité des terrains géologiques affleurants dans la région de Salé a permis et permet encore la fourniture des matériaux nécessaires à la construction et aux travaux de la restauration des monuments historiques de la ville de Salé. Le substratum géologique lui procure d'excellents matériaux nécessaires pour l'édification de ses monuments. Il fournit essentiellement la pierre en provenance des calcaires gréseux dunaires, les argiles marneuses des couches du Vindobonien qui affleurent au niveau des petites vallées perpendiculaires au Bou Regreg, les cailloutis fournis par les couches du Villafranchien et du Salétin, et le sable pour compléter le riche éventail d'une nature généreuse.

L'enceinte de la médina de Salé présente différentes variétés du matériel calcarénitique. Ces types de matériaux apparaissent dans les carrières proches de la ville et présentent des propriétés pétrophysiques différentes. Ce polyolithisme peut être expliqué par deux raisons : d'une part, les nécessités techniques, et d'autre part une différence d'époque de construction.

1- Pierre de taille

La calcarénite a été le matériau de construction le plus usité par les anciennes civilisations de la région de Rabat-Salé. L'exploitation de la calcarénite s'est poursuivie à Salé au cours des siècles de l'islamisation, pendant l'époque des Almohades, des Mérinides et des Alaouites. Elle continue à être utilisée également pendant la colonisation européenne au XX^{ème} siècle et encore à nos jours.

C'est une pierre calcarénitique coquillière qui constitue le matériau dominant sur la façade extérieure. La taille de ces pierres de moyen appareil est soignée. On observe parfois, l'alternance de lits épais et de lits minces; l'arc des portes est fort bien appareillé en claveaux de faible épaisseur. Mais, en dehors de la façade extérieure, cette pierre donne aux constructions un aspect esthétique dû à la variété de dureté, de grains et de couleur. Elle possède la panoplie complète des propriétés recherchées par les constructeurs : la résistance mécanique, l'isolation phonique, la résistance à l'incendie, la durabilité, et l'aspect esthétique.

Elle n'a jamais cessé d'être employée dans la plupart des constructions, elle prend place aux endroits les plus sensibles de la construction : aux chaînages d'angle pour confronter les moellons, aux pieds-droits des portes pour soutenir les arcs (ici elle est assemblée en moyen et petit appareil alterné), ainsi que les fondations, les murs historiques et actuels, les façades des bâtiments, les tours et les portes (Fig.3.2).

Les études pétrographiques montrent que les roches composant l'enceinte ont généralement la même composition minéralogique. La roche est un calcaire gréseux avec un ciment sparitique et une matrice micritique sous forme de bandes parallèles. Les phases détritiques sont formées par des grains subangulaires de quartz et quelques fragments de roches, micas et des feldspaths.

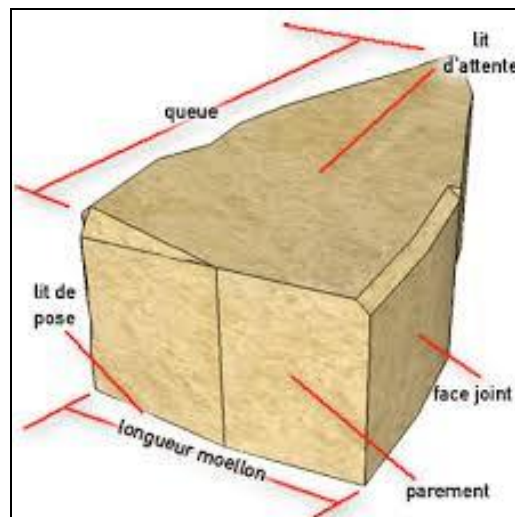


Fig.3.2 Les différentes parties d'une pierre appareillée

Les principaux minéraux sont la calcite (microcristalline) et le quartz, avec du feldspath potassique, micas, dolomites et minéraux argileux comme composants mineurs. Les grains détritiques ne sont pas jointifs, indiquant une faible diagenèse et facilitant la présence de porosité. Cette calcarénite a une composition minéralogique, une morphologie, et une texture similaire aux calcarénites du Plio-Quaternaire des formations proches de Salé. Donc, la roche mise en œuvre, comme pour la plupart des monuments de Rabat, est un calcaire

gréseux (calcarénite) provenant des carrières proches de la ville (carrières de Bouknadel). Les niveaux exploités diffèrent cependant suivant les dates de construction des murailles et aussi le maître d'ouvrage. Elle est constituée essentiellement de carbonates de calcium CaCO_3 et une composition minéralogique qui diffère d'un gisement à un autre suivant les caractéristiques qui sont liées essentiellement au mode de dépôt.

Selon la classification de Fronteau et al. (1999) qui repose sur la morphologie d'altération (croûtes et patine, dissolution, desquamation, désagrégation, et fragmentation), on peut dire que la roche monumentale de Salé a un comportement de type C et D (Fig.3.3). Les comportements C et D de la pierre monumentale correspondent à une utilisation normale dans un milieu agressif (un milieu urbain par exemple). Dans le type C (« pierre dégradée »), l'altération qui se développe du fait du milieu correspond à l'altération préférentielle de la roche, et il se produit un phénomène d'amplification. Dans le type D (« pierre altérée »), l'altération développée diffère ou s'oppose au mode de dégradation lié au microfaciès, la roche s'altère selon un mode conditionné par le milieu.

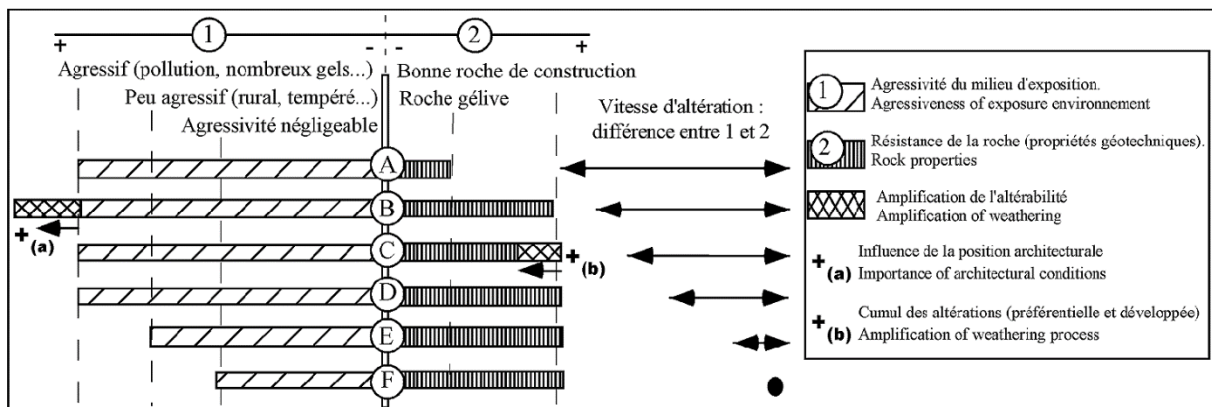


Fig.3.3 Comportements tégénétiques théoriques d'une roche en œuvre (Fronteau et al.1999)

La figure montre que: - la pierre inapte A ne résiste pas aux contraintes liées à une utilisation en œuvre.

La pierre inadaptée B, on observe la destruction de la roche sous certaines conditions d'utilisations.

La pierre agressée C montre une altération développée correspond à l'altération préférentielle de la roche (l'amplification)

La pierre altérée D : montre que l'utilisation en œuvre de la roche entraîne une altération différente de l'altération préférentielle.

La pierre préservée E, sous un milieu d'utilisation peu agressif, s'altère lentement, selon son altération préférentielle.

La pierre conservée F ne se dégrade pas parce que la rupture d'équilibre liée à l'utilisation en œuvre est faible.

2- Moellons

Les moellons sont des blocs de pierre brute façonnée aux formes les plus simples possibles. Suivant leur provenance et l'emploi qu'on veut en faire, on distingue les moellons bruts, les libages, les moellons d'assise et les moellons d'appareil (Fig.3.2).

La masse des murs est faite par des moellons dégrossis et couverte d'un enduit, alors que la surface intérieure des murs est construite avec des moellons bruts de taille différente (Fig.3.4 a et b).

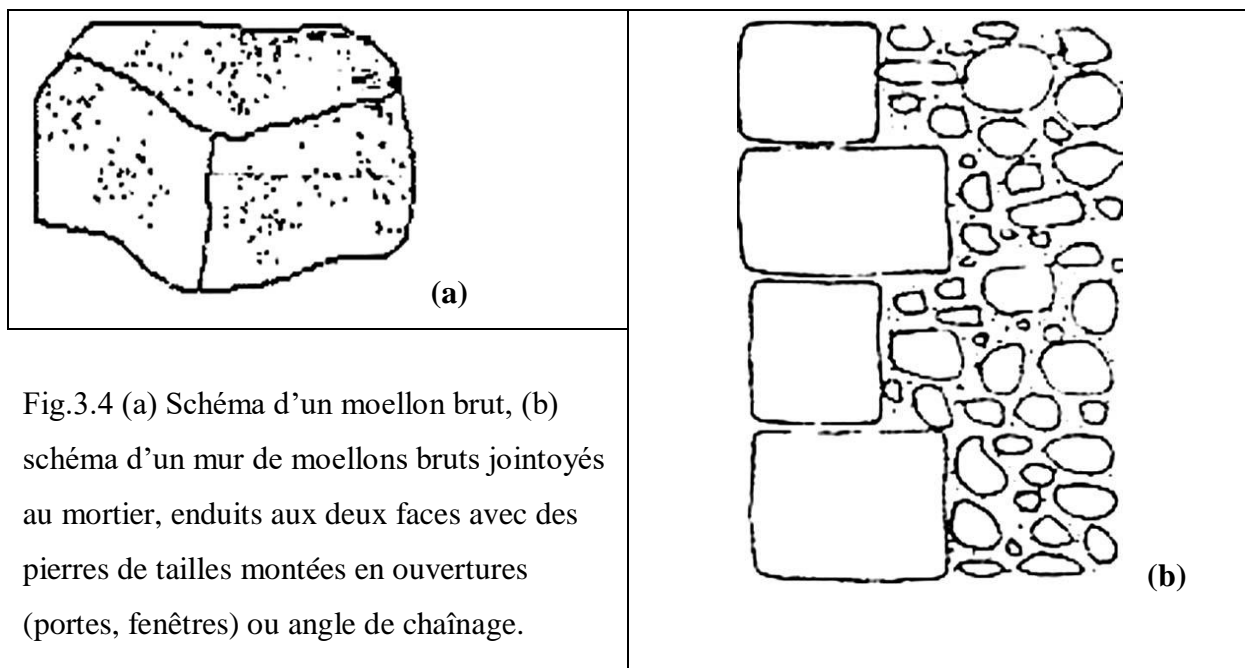


Fig.3.4 (a) Schéma d'un moellon brut, (b) schéma d'un mur de moellons bruts jointoyés au mortier, enduits aux deux faces avec des pierres de tailles montées en ouvertures (portes, fenêtres) ou angle de chaînage.

3- Briques

Leur présence est remarquable à l'intérieur des tours (les escaliers et les voûtes des chambres de défense), au plafond de l'intérieur de la porte ainsi que sur la terrasse. Les briques, de dimensions 25x13x3 cm³, étaient souvent noyées dans du mortier; l'argile nécessaire à la fabrication de ces briques pleines venait des couches qui affleurent dans les petites vallées à côté de l'oued Bou Regreg.

4-Bois

L'emploi du bois dans ce monument est restreint ; il est utilisé horizontalement comme linteaux des meurtrières et des portes non voûtées et diagonalement dans les chaînages d'angle. Le bois utilisé est le thuya qui provenait peut être de la forêt de Zaër.

5- Mortier

Les liants utilisés dans le mortier et les enduits des maçonneries traditionnelles de la médina sont la chaux, le sable et l'argile avec parfois des cailloutis. Le mortier joue un rôle fondamental dans la maçonnerie, il assure la liaison et la cohésion des éléments, et donc, la solidité de l'ouvrage qui devient monolithique. Quant à l'enduit, il a deux rôles principaux : d'une part, assurer l'étanchéité globale de la paroi en limitant la quantité d'eau pouvant atteindre le support (il assure ainsi la fonction d'imperméabilité), d'autre part, il contribue au bon aspect en rectifiant les défauts de planéité de la paroi. Le sable est tiré essentiellement des plages qui s'étendent de part et d'autre de Salé. Dans les dépôts des plateaux autour de Salé se trouve une couche particulièrement riche formée de limons argilo-sableux appelés limons rouges (*hamri*). Ce sont les argiles marneuses des couches du Vindobonien qui affleurent au niveau des petites vallées perpendiculaires à l'oued Bou Regreg, les cailloutis sont exploités des couches du Villafranchien et du Salétin.

V- Conclusion

L'observation des remparts de la médina de Salé révèle une construction de type médiévale, de forme trapézoïdale, avec un mélange d'aspect architectural ornemental par ses décorations et défensif par ses tours et ses borjs. Actuellement, ils présentent un héritage culturel d'une valeur importante sur le plan social, et aussi au niveau de l'aménagement de la ville. Ces murailles ont été renouvelées et restaurées à différentes époques de leur histoire.

Une panoplie de matériaux de construction a été employée pour la construction de ces murailles : pierre appareillée, moellons, briques, bois et enduits traditionnels. La calcarénite est le principal matériau utilisé sous forme de pierre appareillée et de moellon.

La constitution de ces matériaux diffère selon qu'il s'agisse d'une porte, d'une muraille, d'un borj ou d'une tour. La richesse du substratum de la région offre ces divers matériaux et permet encore son exploitation en cas de restauration. Ces caractères rendent cette enceinte d'une valeur importante sur le plan architectural ainsi que culturel, qu'il faut à tout prix protéger en tant que patrimoine civilisationnel du Royaume du Maroc.

Chap. 4 : Symptômes et causes de dégradations des remparts de l'enceinte de Salé

I- Introduction

La plupart des monuments de Salé, vieux de plusieurs siècles, sont dans un état de dégradation lamentable, en particulier, l'enceinte de la médina. Les restaurations successives de celle-ci offrent une vision hétérogène à l'aspect général des remparts. La pratique de réparations ponctuelles donne en effet, une allure hétéroclite au monument, ce qui ne facilite pas toujours sa lecture. On remarque après quelques temps de la restauration, le rejet des matériaux de restauration par les remparts. On peut dire que le bilan d'un demi-siècle de restauration des remparts n'est pas efficace, si l'on se limite à leur aspect. Les renseignements tirés de cette restauration contribuent pour une part à préciser le diagnostic de l'état actuel de dégradation et à éviter les erreurs du passé. En effet, un ensemble de facteurs dégradants d'action conjuguée donne un aspect très endommagé à l'enceinte dont les études ont révélé une relation étroite entre les symptômes de dégradation et les facteurs physico-chimiques, biologiques et climatiques environnants.

II- Les symptômes de dégradation des monuments historiques

La classification des dégradations en œuvre est basée sur le type du processus d'altération (chimique, physique, biologique) et sur la morphologie des dégradations. Les termes employés s'inspirent de la nomenclature proposée par Jeannette (1992 a et b). La croissance des altérations sur une roche donnée dépend majoritairement de l'exposition du bloc, des circulations d'eau dans la roche et de la composition chimique de l'atmosphère ambiante.

Dans un monument donné, les symptômes sont visibles et peuvent être facilement décelés et différenciés des autres. Toutefois, non seulement les signes

principaux de détérioration peuvent survenir ensemble, mais encore, leurs différentes formes sont susceptibles de se manifester en même temps. Généralement, les dégradations des pierres dans les monuments historiques peuvent être subdivisées en quatre groupes essentiels : les patines, les altérations physiques, les altérations chimiques et les altérations biologiques.

1- Les patines

Elles correspondent à une évolution superficielle de couleur ou de texture sans changement de la forme ou de la résistance de la pierre. L'acquisition de ces teintes superficielles est due à un léger enrichissement de la couche externe de la pierre en oxydes de fer. En effet, lors de la migration des fluides par capillarité, les oxydes sont transférés vers la surface d'évaporation où ils s'accumulent formant la patine (Chauffriat, 1999).

La patine la plus connue est le calcin (CaCO_3) qui se forme sur les roches calcaires par le dépôt de la calcite. Elle isole la surface d'une pierre du milieu ambiant (Froidevaux, 1986). Cette pellicule de 1 à 2 mm d'épaisseur, se forme également sur la calcarénite comme des stalagmites par solubilité du carbonate de calcium sous l'effet de l'eau pluviale riche en dioxyde de carbone (Plenderleith, 1966). La cause de la modification naturelle de la structure superficielle de la pierre est, donc, liée à l'action externe des eaux de pluie. Ce calcin est important, car, il constitue une enveloppe dure protectrice et peu perméable aux intempéries (Biliotti, 1986).

2- les altérations physiques

Elles résultent d'une dissociation des constituants de la roche sans changement de leur nature minéralogique. Elles se manifestent sous plusieurs formes :

a- Les ravinements

Ils se produisent sur des éléments exposés à des ruissellements accidentels, et provoquent le creusement des lits les plus tendres. Ils sont la conséquence la plus spectaculaire des écoulements d'eau sur la pierre monumentale.

b- Les fissures

Ce genre de dégradation exprime un désordre dans la structure des monuments. Les fissures peuvent avoir plusieurs formes (horizontale, verticale et oblique). Ces fissures se produisent à cause des contraintes de charges exercées, soit par la poussée latérale ou par une surcharge de la maçonnerie ou l'insuffisance de fondations ou sous l'effet des différents séismes.

c- Les plaques

Les pierres soumises à des variations de température ou de saturation de l'eau peuvent subir des dilatations thermiques et hydriques, et causer par la suite des éclatements qui aboutissent à un décollement en plaques.

3- Les altérations chimiques

Dans ce type d'altération, les minéraux de la partie superficielle de la pierre sont transformés par :

- Un départ d'éléments par dissolution et désagrégation sableuse
- Un apport d'éléments, c'est à dire encroûtement.

a- Les dissolutions

Au cours d'une précipitation, les premières fractions de l'eau qui tombent sur des pierres relativement sèches, y pénètrent en grande quantité ; les fractions suivantes touchent des pierres déjà imbibées d'eau sur lesquelles elles ruissellent provoquant ainsi des dissolutions. Ces dernières se développent sur les matériaux carbonatés (pierres calcaires ou mortier de chaux). En effet, les solutions qui y transitent s'évaporent à des profondeurs différentes, les sels déposés en surface forment des efflorescences blanches (Fig.4.1). Herrero en 1967, définit les efflorescences comme des substances dissoutes à l'intérieur de la pierre et qui, après évaporation, déposent à la surface soit des sels des métaux alcalins ou des sulfates de magnésium et de calcium ou des chlorures et des nitrates des alcalino-terreux. La succession de phénomène humidité-séchage provoque une désagrégation importante et une expansion de la pierre en revêtement (boursouffure), ainsi qu'une contrainte et des microfissures sur la

surface qui se détériore facilement et peut parfois aboutir à un éclatement de la pierre monumentale (Torraca, 1986).

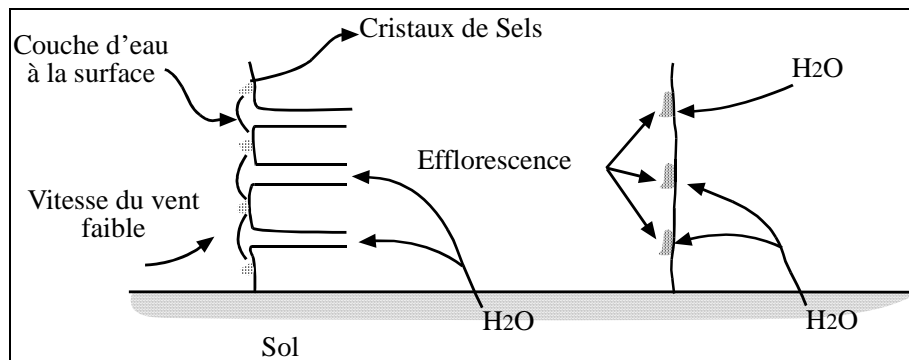


Fig.4.1 Schéma représentatif du phénomène d'efflorescence

b- Les désagrégations sableuses

Les sels déposés à l'intérieur des pierres granuleuses humides non lessivées, provoquant le dessertissage des grains et un creusement rapide de la pierre : désagrégation sableuse.

Sur quelques pierres, on assiste à une érosion différentielle qui se développe en aboutissant à la formation de multiples cavités ayant des formes et des dimensions variées : **Alvéoles**.

Ces alvéoles ou érosions alvéolaires (Fig.4.2) se caractérisent par le fait qu'une désagrégation se produit, de préférence dans certaines zones, formant des cavités profondes (ou alvéoles). Ce phénomène se produit fréquemment sur les surfaces exposées aux vents forts où l'évaporation de l'eau circulant dans les pores est accélérée. Les dommages causés par la cristallisation étant aggravés, et la surface d'évaporation se désagrège très vite. De plus, le processus de désagrégation va en s'accroissant au fur et à mesure que la cavité se creuse du fait que la vitesse du vent augmente à l'intérieur de ces cavités à cause de la formation de tourbillons d'air, ce qui provoque une accélération de l'évaporation au niveau cette zone (Torraca, 1986).

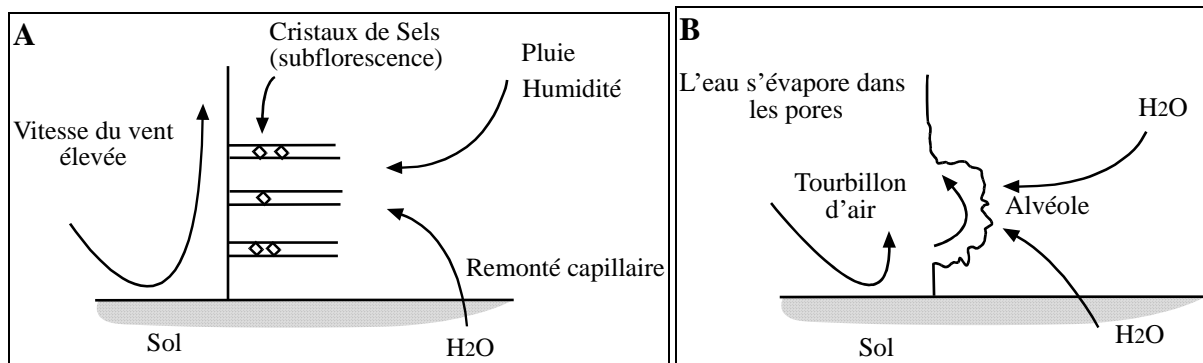


Fig.4.2 : Schéma représentatif des étapes (A et B) de la formation d'une alvéole

c- Les encroûtements

Les encroûtements ou incrustations sont les dépôts externes qui se forment sur une surface. Selon le mécanisme qui les engendre, ils sont subdivisés en deux types : les dépôts noirs et les dépôts blancs (efflorescence).

Les dépôts noirs sont généralement des encroûtements sulfatés grisâtres ou noirâtres. Ils sont de consistance plus ou moins dure, de quelques dixièmes à quelques millimètres d'épaisseur, d'aspect lisse, noduleux ou dendritique. Ils recouvrent la surface externe des blocs en œuvre (Fig.4.3). Ils ont comme origine de la poussière et autres éléments qui se déposent soit par voie sèche ou par voie humide :

- Dans le cas du dépôt par voie sèche, ces dépôts noirs peuvent s'accumuler et former une stratification peu cohérente sous forme de poudre qui se colle à la pierre. Elles forment alors, des croûtes dures constituées de cristaux de dihydrate de sulfate de calcium, qui se transforme par la suite, en croûte noire après leur mélange avec les particules carbonées, provenant de la combustion des hydrocarbures, dispersées dans l'atmosphère.

- Dans le cas du dépôt par voie humide (par condensation ou par eau pluviale), ces dépôts forment des incrustations qui adhèrent solidement à la surface de la pierre. Elles sont constituées de carbonate de calcium et de sulfate de calcium.

En fait, la composition chimique et les propriétés physiques d'une croûte noire sont différentes du reste de la pierre. Ces différences accélèrent la dégradation

des pierres. La dégradation peut aussi se poursuivre sous la croûte qui couvre souvent un matériau peu cohérent et désagrégé.

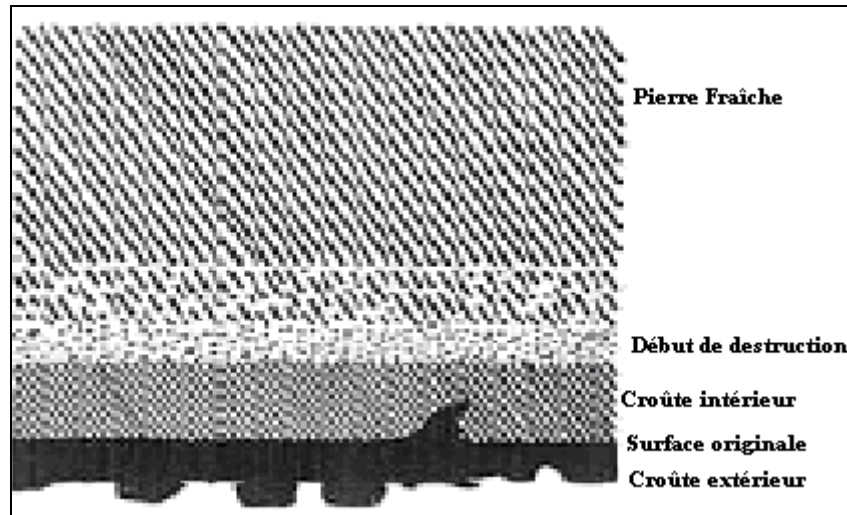


Fig.4.3 Schéma représentatif de la formation de la croûte noire

4- Les altérations biologiques

Le terme « altération biologique » ou biodégradation désigne toute modification non souhaitée des propriétés des matériaux de construction résultant de l'activité de microorganismes et/ou d'organismes appartenant aux divers groupes de la systématique, notamment les arbres, les algues, les lichens et les bactéries (Caneva et Salvadori, 1988). En effet, la biodégradation est plus ou moins importante suivant la constitution des roches et le milieu environnant. Les climats chauds et humides favorisent le développement de ce mécanisme d'altération.

a- Les arbres et plantes

Les arbres et les plantes qui poussent sur les édifices indiquent généralement une humidité importante des matériaux de construction. Leurs racines contribuent aussi dans l'accélération de la détérioration de la maçonnerie par pression racinaire.

Dans l'enceinte de Salé, l'arbre présente l'exemple le plus concret de cette altération. En exemple, le figuier qui apparaît un peu partout dans l'enceinte

surtout les tours, contribue par ces racines à accentuer des ouvertures dans les pierres, ce qui a causé des désordres remarquables dans la structure des murailles.

b- Algues, champignons et lichens

Les édifices sont souvent couverts d'algues et de lichens ; on rencontre ces organismes près des descentes d'eau de pluie et dans les parties des soubassements de l'édifice mouillées par la remontée d'eau du sol.

Les lichens prospèrent à la surface ou sous la surface de la pierre et produisent des acides licheniques ; les surfaces des pierres finissent par avoir une structure creusée d'alvéoles et traversée de sillons. Ces lichens participent également au décollement d'enduits de revêtement des pierres monumentales.

D'autres champignons creusent leur chemin dans la pierre et produisent des acides organiques (très agressifs), qui, à leur tour produisent des sels et des minéraux causant ainsi la détérioration de la pierre monumentale (Fassina, 1988).

Certaines algues comme les endolithes calcicoles creusent la calcarénite par le fait qu'ils dissolvent activement les carbonates, en pénétrant le substrat et formant des microcavités de morphologies différentes selon les espèces (Caneva et Salvadori, 1988). Ces microcavités peuvent se produire pour constituer des lignes d'érosion plus ou moins profondes. La présence d'algues sur un parement est significative pour localiser l'humidité sur un élément.

III- Pathologies de dégradation observées sur l'enceinte de Salé et relevées floristiques

Les missions sur terrain nous ont permis de relever les différents aspects de dégradations dont souffrent les murailles et les portes de l'enceinte; on a essayé dans un premier temps de décrire l'état actuel de l'enceinte à l'aide d'analyse visuelle; dans un deuxième temps, on a effectué des relevés floristiques des végétaux peuplant les murailles et les tours de l'enceinte, ainsi que ceux présent

dans les carrières de Bouknadel. A partir des principales formes d'altération identifiées et de l'état des connaissances sur les altérations des matériaux pierreux, une orientation des recherches sera définie.

1-Aspect des formes de dégradation sur l'enceinte de Salé

Plusieurs formes de dégradations sont observées sur les murailles de l'enceinte de Salé. Ces pathologies sont groupées dans les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 selon la position de pathologie sur le site et son intensité.

a- Les croûtes

Ces croûtes sont observées essentiellement sur les pierres appareillées des portes de l'enceinte qui donnent accès à l'intérieur de la médina, et sur les moellons de la façade intérieure des remparts. L'aspect de ces croûtes est très variable : la couleur varie du gris au noir, cette dernière est la plus observée (croûte noire); son épaisseur s'étend de quelques millimètres à quelques centimètres (photo 4.1). Dans la plupart des cas, lorsque ces couches restent peu épaisses, les reliefs originels de la pierre sont conservés. Par contre, lorsque leur épaisseur atteint plusieurs centimètres, elles prennent des formes irrégulières, dendritiques, qui modifient complètement l'aspect de la surface. Sur les remparts, ces encroûtements présentent des degrés différents selon la position de chaque porte. La croûte noire est la forme de dégradation la plus observée dans les remparts de l'enceinte de Salé. Elle est considérée comme un facteur important dans leur dégradation.

Ces encroûtements s'observent sur les édifices proches des routes les plus fréquentées (Rabat - Kénitra, Rabat - Meknès et passant par Salé). Ces routes génèrent de grandes quantités de polluants qui attaquent la pierre calcaire et dont l'effet est influencé par les facteurs environnementaux. En exemple, Bab Mrisa est situé près du pont El Fida qui connaît une circulation intense 40100 trafics moyens /jour c'est à dire 28% du trafic de Rabat-Salé (Direction d'urbanisme, 2005).



1

2



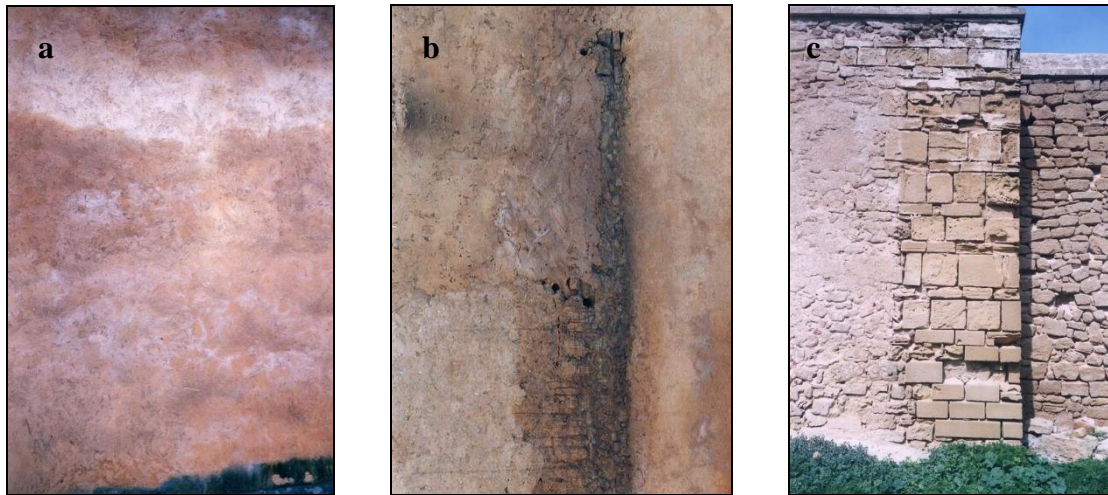
3

4

Ph 4.1 Aspects des croûtes noires sur les portes de l'enceinte de Salé (1, 2 Bab Mrisa ; 3 Bab Sebta ; 4. Bab Antar).

b- Les tâches d'humidité et les zones blanchâtres

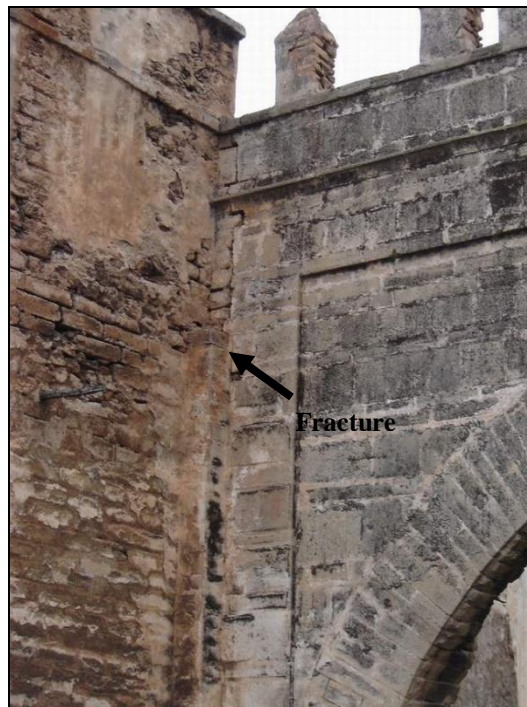
On observe généralement les tâches d'humidité après une saison pluviale, elles sont de hauteur variable et s'observent sur les revêtements des façades extérieures des remparts dans les parties soumises à la pluie battante ou ruisselante. Après, ces tâches s'assèchent pendant la saison d'été, et à la limite supérieure apparaissent des zones blanchâtres. Elles sont observées à la base des murs ainsi qu'à des hauteurs pouvant atteindre 5m marquant la limite des atteintes par les tâches d'humidité (photo 4.2).



Ph 4.2 Tâches d'humidité et les croûtes blanchâtres sur la muraille Bab Sebta (a), Bab Fès (b) et la muraille Borj Sidi Ben Achir (c).

c- Les fissures

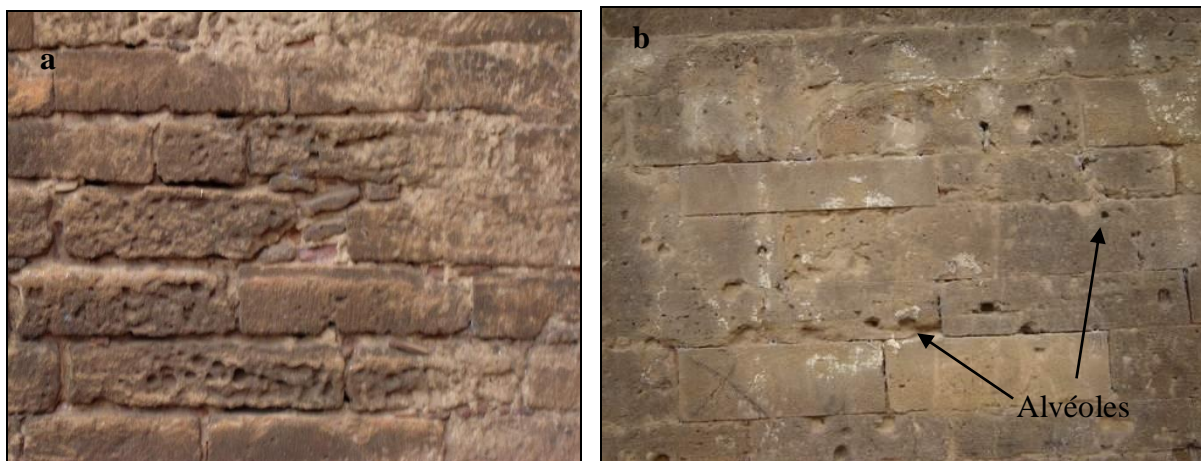
Des microfissures apparaissent sur les enduits de revêtement sous forme de craquelures, qui après une courte période, se traduisent par le décollement d'enduit. On note aussi la présence de fissures au niveau de la pierre monumentale surtout au sommet des murailles et des portes (photo 4.3).



Ph 4.3 Large fracture au sommet de la porte Bab Antar

d- L'alvéolisation

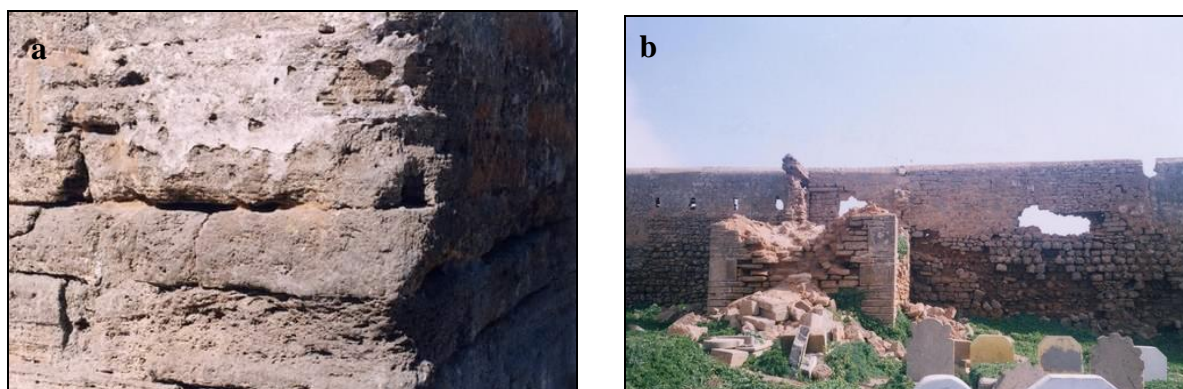
Les alvéoles sont présentes dans les pierres appareillées des portes monumentales, des angles de chaînages et des tours de l'enceinte de Salé. La roche devient poudreuse au niveau des cavités, ces dernières sont de taille et de dimensions variables (photo 4.4).



Ph 4.4 (a, b) Aspects des alvéoles sur les pierres monumentales de l'enceinte de Salé

e- L'érosion ou désagrégation sableuse

L'érosion est visible à la base des murailles surtout à la base de Borj el Kebir et à Bab Antar. Elle est probablement due à l'ascension capillaire. Les zones avoisinant la mer montrent aussi une désagrégation des grains de pierre, elle est due à la percolation de l'eau salée de la mer et les niveaux élevés d'humidité (cas de Borj Sidi Ben Achir). Ces désagrégations granulaires aboutissant, par perte de cohésion des éléments constitutifs du calcaire, à de petites perforations millimétriques allant jusqu'à des alvéoles de plusieurs centimètres (photo 4.5).



Ph4.5 Désagrégation et érosion de la pierre appareillée de Bab Sebta (a) et de la muraille Borj Sidi Ben Achir (b).

f- Desquamations ou décollement en plaques

Sur les remparts de Salé, ce phénomène s'observe dans les pierres appareillées des portes de l'enceinte (photo 4.6). Il se présente sous forme de desquamations débitant la pierre en feuillets et d'épaisseur millimétrique, parallèles à la surface d'exposition.



Ph 4.6 Décollement en plaques de la pierre monumentale de Bab Sebta (a) et Bab Mrisa (b).

g- Les restaurations inadaptées

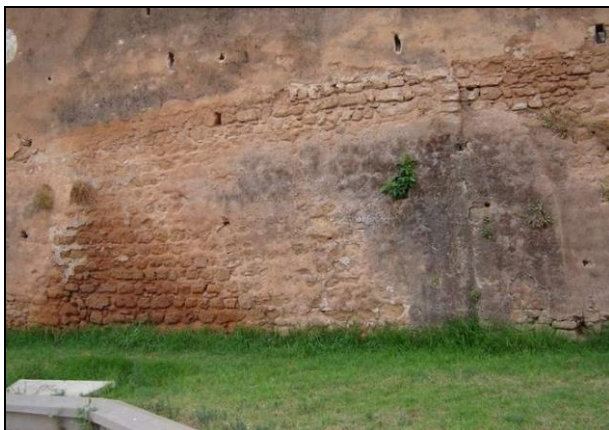
L'étude des dernières interventions de restauration, ayant débuté de 2002 jusqu'à l'heure actuelle montre que :

- On a remarqué sur le terrain qu'un seul mélange est utilisé comme mortier de jointoiment et aussi comme enduit de revêtement, alors que normalement les proportions de chaque mortier varient selon la fonction envisagée. Le mortier traditionnel destiné à la confection des joints de maçonnerie a le dosage suivant : $\frac{2}{3}$ de volume de sable + $\frac{1}{3}$ de volume de chaux, alors que le mortier destiné à la réalisation des enduits de revêtement a le dosage suivant : $\frac{1}{3}$ de volume de sable + $\frac{2}{3}$ de volume de chaux. Le dosage en argile varie selon le degré de coloration souhaité par les restaurateurs.
- Le mélange préparé ne prend pas le temps nécessaire (d'un mois à 6 mois) pour mûrir suffisamment et pour une bonne fermentation, ce qui donne un enduit poudreux qui n'adhère pas convenablement aux pierres et se détache facilement une fois appliquées (photo 4.7).

- L'étanchéité n'est pas efficace, ce qui se traduit par la stagnation de l'eau de pluie et la prolifération des végétaux (photo 4.8).
- L'utilisation de matériau pierreux défectueux : pierre de carrière en mauvais état avec des fissures et qui n'est pas bien séchée ou l'utilisation des pierres de carrière qui sont différentes des pierres originelles (photo 4.9).
- Le mortier employé remplit les vides entre les pierres et il est maintenu en place par compression sans contribuer à la solidité de la construction, du fait qu'il ne résiste pas aux efforts de tension et à un coefficient de frottement trop faible. Une pression peut alors se produire entre les pierres ou les briques et le déséquilibre dans la répartition des charges provoquant des dégâts.
- On observe après quelques temps de l'éradication des plantes pendant les opérations de restauration l'apparition de nouvelles plantes, ce qui signifie qu'elle n'est pas complète.



Ph 4.7 Décollement d'enduit de la muraille de Bab Antar (a ; b).



Ph 4.8 Prolifération des végétaux après une courte période de restauration.

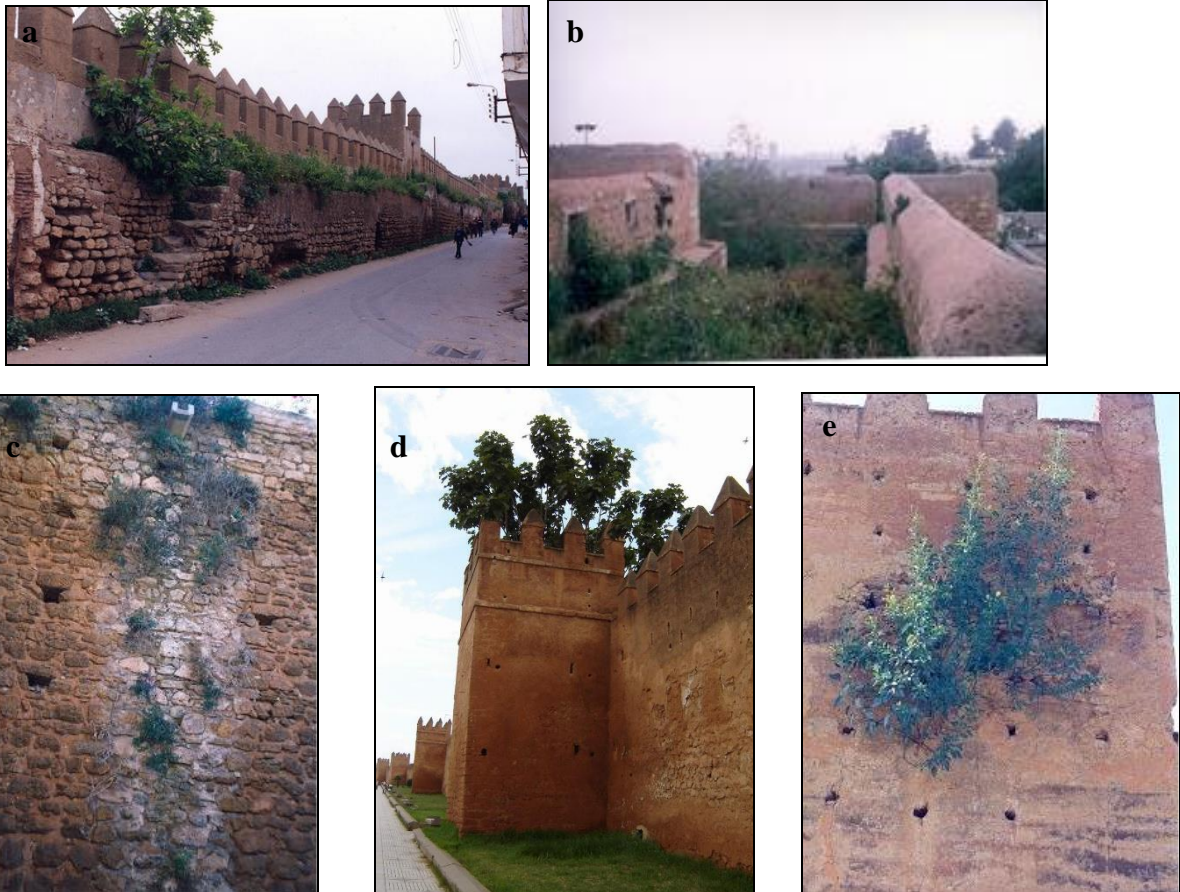


Ph 4.9 Utilisation des matériaux différents des matériaux d'origine (morceaux de briques (a), du ciment (b) et autres).

h- La végétation

L'enceinte de la médina de Salé est surpeuplée de végétation. On remarque l'abondance des végétaux dans les façades intérieures des murailles, à tous les niveaux (de la base au sommet). Les tours présentent de vrais champs de végétaux (en exemple : tour Bab Fès, et les tours de la façade intérieure de la muraille Bab Sebta). Des lichens sont aussi présent surtout au niveau des descentes de l'eau de pluie et dans les parties de soubassements de l'édifice mouillées par la remontée capillaire d'eau du sol.

L'abondance de cette végétation nous a incité à effectuer des relevés floristiques afin de déterminer les espèces florales présentes. La connaissance précise de la composition floristique va permettre aux restaurateurs le choix des méthodes de lutte nécessaire contre les végétaux adventifs et d'utiliser les herbicides qui attaquent les spores et les pollens sans endommager les matériaux de construction.



Ph 4.10 Prolifération des végétaux le long de façade intérieure de la muraille Bab Sebta (a) et dans la tour Bab Fès (b), le long des descentes d'eau (c) et au sommet des tours (d, e).



Ph 4.11 Prolifération des lichens au niveau des descentes de l'eau de pluie et dans les parties supérieures de l'édifice mouillées.

Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 regroupent l'ensemble des pathologies observées respectivement sur les murailles de l'enceinte de Salé, Bab Sebta et Bab Mrisa selon leur distribution et leur intensité. On remarque les formes de dégradation

observées sur les remparts et les portes de l'enceinte de la médina de Salé sont multiples : décollement d'enduit, alvéolisation, encroûtements de couleur différente, colonisation par différents types de végétation, fissures, tâches d'humidité. Le degré d'évolution d'une même pathologie varie de la base au sommet et entre l'extérieur et l'intérieur sur le même mur.

Pathologies	Façade		Position			Orientation			
	Interne	externe	Sommet	Centre	Base	SE	SW	NW	NE
Erosion	+++	++	+++	++	+++	++	+	+	+++
Croûtes noires	+	+++	+	++	+++	++	-	++	+
Biodégradation	+++	++	+++	+	+++	++	+	++	+
Colonisation	+	++	++	++	-	++	+	++	+
Moisissures	+	++	+++	++	++	++	++	++	++
Restauration	+	+++	++	+++	+	++	+	++	++
Alvéolisation	+	+++	+	+++	++	+++	++	+++	++
Décoloration	++	++	+	+	+	+	++	+	++
Efflorescence saline	-	+++	-	++	+++	+	-	++	-
Fissures	+++	++	++	+	+	++	+	++	+
Tâches d'humidité	++	+++	+	+++	+++	+	+	+++	++

Tab. 4.1 : Distribution et importance des pathologies sur l'enceinte de la médina de Salé
(-) absent, (+) faible, (++) intermédiaire et (+++) forte

Pathologies	Face Externe			Face interne		
	Sommet	Centre	Base	Sommet	Centre	Base
Erosion	-	+	+	-	+	++
Croûte noire	++	+++	+	+	+	-
Croûtes blanches	-	++	++	-	+	++
Biodégradation	++	+	+	++	+++	++
Colonisation	++	+	+	++	+	+
Moisissures	++	+	-	-	+	+
Restauration inadaptée	+	+	++	-	-	-
Alvéolisation	+	++	++	+	++	++
Décoloration	+	++	++	+	+	-
Efflorescence saline	-	++	++	-	-	-
Fissures	-	+	+	+	++	-
Tâches d'humidité	+	+++	++	-	-	-

Tab. 4.2 : Distribution et importance des pathologies de Bab Sebta

Pathologies	Face externe			Face interne		
	Sommet	Centre	Base	Sommet	Centre	Base
Erosion	-	+	++	+	++	++
Croûte noire	++	+++	++	+	++	+
Biodégradation	++	+	+	++	+	++
Colonisation	++	++	+	+	++	-
Moisissures	++	++	+	-	++	+
Restauration inadaptée	++	+++	++	++	++	++
Alvéolisation	++	+++	+++	+	++	++
Décoloration	++	+++	++	+	+	+
Efflorescence saline	-	++	++	-	+	+
Fissures	-	-	-	++	++	-
Tâches d'humidité	+	+++	++	-	+	+

Tab. 4.3 : Distribution et importance des pathologies de Bab Mrisa

L'analyse des tableaux montre que divers types de pathologies affectent l'enceinte. On a constaté qu'une forme de dégradation ne se présente pas toute seule, mais toujours avec d'autres types de dégradations et à des intensités différentes. Ceci témoigne vraisemblablement de la relation étroite existante entre les causes de ces dégradations.

Il faut signaler que malgré les restaurations récentes, les décollements d'enduit, les colonisations par la végétation, les encroûtements, les alvéolisations et les tâches d'humidité se reproduisent après quelques mois de ces restaurations.

2- Relevés floristiques sur le terrain

D'après les relevés des pathologies de l'enceinte de Salé, on a remarqué l'importance des végétaux comme pathologies au niveau des tours, des murailles, etc. ce qui nous a incité à établir un inventaire des relevés floristiques afin de déterminer et d'identifier les espèces qui ont été collectés et répertoriées et établir une liste des végétaux peuplant l'enceinte de la ville de Salé et de faire une comparaison avec celles de la carrière de Bouknadel. Les espèces ont été déterminées par le Laboratoire du malherbologie de Département d'Ecologie à l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II à Rabat. Les flores qui ont été utilisées pour l'identification des espèces sont les suivantes : Flore illustrée des mauvaises herbes des cultures du Gharb (Taleb, 1995), flore de la

Tunisie (Pottier–Alapetite, 1979-1981), nouvelle Flore d’Algérie et des régions désertiques méridionales (Quezel et Santa, 1962-1963).

La vérification de ces identifications a été faite en se référant au Catalogue Des Plantes Du Maroc (Jahandiez et Maire, 1931/1932/1934). Pour les lichens, les algues et les bactéries, une étude s’impose pour cerner plus l’altération et la dégradation des monuments historiques de la ville de Salé.

a- Méthodologie

Les relevés floristiques effectués sont des échantillons systématiques présentes sur les remparts de l’enceinte de Salé et la carrière de Bouknadel. Les espèces collectées ont été prises de différents emplacements sur un même site : la base, sommet, extérieur, intérieur. Le tableau 4.4 récapitule les sites prospectés lors de la collecte de la végétation dans la médina de Salé et le nombre d’espèces y récoltées.

Tab. 4.4 : Liste des monuments prospectés dans la médina de Salé et la carrière de Bouknadel.

	Monument et site	Nombre d’espèce
SALTI	Bab Fès	15
	Bab Sebta	7
	Borj Sidi Ben Achir	13
	Carrière Bouknadel	24
	Muraille Bab Mrisa	24
	Muraille interne Bab Chaâfa	12
	Muraille interne Bab Sebta	26

b- Résultats et caractérisation de la flore récoltée

Les relevés floristiques des remparts de l’enceinte de la médina de Salé et des carrières de Bouknadel ont été effectués entre le mois Février et mai 2003 à partir de différents endroits sur le même site. Les espèces inventoriées sont au nombre de 93, ce qui représente 2,2% de l’effectif spécifique de la flore du Maroc et 20% des 124 familles botaniques marocaines. Par rapport à l’ensemble

des 838 adventices recensés pour le Maroc occidental et central (Boulet *et al.*, 1989), elles représentent 11,12% de l'effectif spécifique.

Les 93 espèces récoltées appartiennent à 35 familles botaniques dont 2 Monocotylédones et 33 Dicotylédones (Tab.4.5).

N°	Espèce	Famille	Nbr d'espèce	Embranchement
1	<i>Adiantum capillis veneris</i>	Adiantaceae	1	Dicotylédones
2	<i>Aizoon canariense</i>	Aizoaceae	2	
3	<i>Mesembryanthemum crystallinum</i>			
4	<i>Achyranthes aspera</i>	Amaranthaceae	1	
5	<i>Hedera helix</i>	Araliaceae	1	
6	<i>Amberboa lipii</i>	Asteraceae	22	
7	<i>Anacyclus sp</i>			
8	<i>Anacyclus radiatus</i>			
9	<i>Aster squamatus</i>			
10	<i>Calendula arvensis</i>			
11	<i>Carduus pycnocephalus</i>			
12	<i>Centaurea pullata</i>			
13	<i>Centaurea sulphurea</i>			
14	<i>Chamaemelum fuscatum</i>			
15	<i>Chrysanthemum coronarium</i>			
16	<i>Cichorium endivia</i>			
17	<i>Conyza canadensis</i>			
18	<i>Leontodon hispidulus</i>			
19	<i>Leontodon saxatilis</i>			
20	<i>Notobasis syriaca</i>			
21	<i>Phagnalon saxatile</i>			
22	<i>Scolymus hispanicus</i>			
23	<i>Senecio vulgaris</i>			
24	<i>Silybum marianum</i>			
25	<i>Sonchus oleraceus</i>			
26	<i>Urospermum picrioides</i>			
27	<i>Sonchus asper</i>			

Tab.4.5 Liste des espèces récoltées entre Février et Mars 2003 et leurs familles

28	<i>Diplotaxis tenuisiliqua</i>	Brassicaceae	3	Dicotylédones
29	<i>Raphanus raphanistrum</i>			
30	<i>Sinapsis arvensis</i>			
31	<i>Buffonia tenuifolia</i>	Caryophyllaceae	5	
32	<i>Cerastium glomeratum</i>			
33	<i>Polycarpon tetraphyllum</i>			
34	<i>Silene sp (marin)</i>			
35	<i>Stellaria media</i>			
36	<i>Beta macrocarpa</i>	Chenopodiaceae	3	
37	<i>Chenopodium ambrosioides</i>			
38	<i>Chenopodium murale</i>			
39	<i>Hypericum tomentosum</i>	Clusiaceae	1	
40	<i>Convolvulus althaeoides</i>	Convolvulaceae	1	
41	<i>Cotyledon umbellicus veneris</i>	Crassulaceae	1	
42	<i>Bryonia dioica</i>	Cucurbitaceae	1	
43	<i>Cyperus rotundus</i>	Cyperaceae	1	<i>Monocotylédones</i>
44	<i>Mercurialis annua</i>	Euphorbiceae	3	Dicotylédones
45	<i>Ricinus communis</i>			
46	<i>Euphorbia peplus</i>			
47	<i>Astragalus hamosus</i>	Fabaceae	6	
48	<i>Lotus corniculatus</i>			
49	<i>Medicago polymorpha</i>			
50	<i>Melilotus sulcata</i>			
51	<i>Ornithopus isthmocarpus</i>			
52	<i>Trifolium scabrum</i>			
53	<i>Frankenia laevis</i>	Frankeniaceae	1	
54	<i>Erodium ciconium</i>	Geraniaceae	6	
55	<i>Erodium cicutarium</i>			
56	<i>Erodium malachoides</i>			
57	<i>Erodium triangulare</i>			
58	<i>Geranium dissectum</i>			
59	<i>Geranium rosa</i>			
60	<i>Ajuga iva</i>	Lamiaceae	4	
61	<i>Mentha viridis</i>			
62	<i>Salvia officinalis</i>			
63	<i>Stachys ocymastrum</i>			

Tab.4.5 Liste des espèces récoltées entre Février et Mars 2003 et leurs familles (*Suite*)

64	<i>Malva parviflora</i>	Malvaceae	1	Dicotylédones
65	<i>Ficus carica</i>	Moraceae	1	
66	<i>Oxalis pse-carpae</i>	Oxalidaceae	1	
67	<i>Fumaria agraria</i>	Papaveraceae	1	
68	<i>Plantago coronopus</i>	Plantaginaceae	1	
69	<i>Limonium sinuatum</i>	Plumabaginaceae	2	
70	<i>Limonium thouinii</i>			
71	<i>Avena sterilis</i>	Poaceae	7	monocotylédones
72	<i>Brachypodium distachyon</i>			
73	<i>Bromus rigidus</i>			
74	<i>Cynodon dactylon</i>			
75	<i>Lamarckia aurea</i>			
76	<i>Lolium rigidum</i>			
77	<i>Piptatherum miliaceum</i>			
78	<i>Emex spinosus</i>	Polygonaceae	1	Dicotylédones
79	<i>Delphinium peregrinum</i>	Renunculaceae	1	
80	<i>Rhus pentaphylla</i>	Rhamnaceae	1	
81	<i>Rubus ulmifolius</i>	Rosaceae	1	
82	<i>Galium tricornutum</i>	Rubiaceae	1	
83	<i>Ruta graveolens</i>	Rutaceae	1	
84	<i>Misopates orontium</i>	Schophulariaceae	3	
85	<i>Verbascum sinuatum</i>			
86	<i>Veronica polita</i>			
87	<i>Atropa belladonna</i>	Solanaceae	3	
88	<i>Hyoscyamus niger</i>			
89	<i>Nicotiana glauca</i>			
90	<i>Parietaria mauritanica</i>	Urticaceae	3	
91	<i>Urtica dioica</i>			
92	<i>Urtica urens</i>			
93	<i>Peganum harmala</i>	Zygophyllaceae	1	
Total	93 espèces	35 Familles	93	

Tab.4.5 Liste des espèces récoltées entre Février et Mars 2003 et leurs familles (*Suite*)

Selon leurs attributions relatives, 7 familles d'entre elles dominent très nettement la flore adventice des remparts de Salé à savoir : *Asteraceae* (22 espèces), *Poaceae* (7 espèces), *Fabaceae* (6 espèces), *Geraniaceae* (6 espèces),

Caryophyllaceae (5 espèces), *Lamiaceae* (4 espèces). Ces familles regroupent 29,58% de l'effectif spécifique.

L'importante présence de ces familles sur les murailles de Salé peut être expliquée par leur prépondérance à l'échelle nationale, par leur aire de répartition biogéographique méditerranéenne et par leur aptitude à s'adapter à des biotopes instables et très diversifiés (Taleb et Maillet, 1994), en plus de leur productivité élevée des semences, la grande longévité de leurs graines, la dissémination des semences par le vent et les oiseaux et la phénologie parfaitement adaptée à la nature des matériaux de construction des monuments historiques.

3- Conclusion

Les formes d'altération présentes sur les monuments historiques sont classées généralement en quatre groupes : les patines, les altérations physiques, les altérations chimiques et les altérations biologiques.

L'observation des remparts de l'enceinte de Salé montre des formes de dégradations faisant partie de ces quatre groupes, en particulier, des croûtes noires, des tâches d'humidité, des efflorescences, des fissures, des alvéoles, des décollements d'enduit, des érosions, une prolifération de végétaux et des colonisations). La répartition de ces formes de dégradation est non uniforme et varie selon la position dans la muraille et la porte (façade extérieure ou intérieure, base centre ou sommet de la muraille). Ces formes coexistent dans une même muraille, mais, à différentes intensités. Ceci révèle l'étroite relation qui existe entre les différentes causes de dégradation.

Les relevés floristiques et la détermination des espèces végétales dominantes vont permettre au restaurateur de choisir des remèdes spécifiques et les herbicides convenables aux germes de ces espèces végétales sans endommager la roche monumentale.

IV- Les causes générales de dégradation des monuments historiques

A l'emprise du temps s'ajoute diverses causes qui sont à l'origine des dégâts produits sur la pierre monumentale. La qualité intrinsèque du matériau, son utilisation plus ou moins judicieuse et les facteurs climatiques sont des causes primaires déterminant directement la durabilité de ce matériau. A ces causes naturelles se sont ajoutées des causes nouvelles liées à l'urbanisation et la révolution industrielle, c'est-à-dire la pollution atmosphérique.

Afin de pouvoir déterminer les principales causes de détérioration et orienter les restaurateurs vers des voies favorables à la conservation des monuments, on va donner une vue générale sur les causes connues généralement comme agents de dégradations des monuments historiques.

1-Facteurs naturelles

a- Action de l'eau

En général, la détérioration des pierres sous l'action de l'eau est provoquée par la dissolution, la dilatation ou le lessivage des composants des roches. Il facilite les processus de détérioration des roches des édifices historiques par voie chimique, biologique, et dans certains cas physique. Elle peut agir soit directement sur les parties exposées aux intempéries (pluie, neige, brouillard), soit par condensation de la vapeur d'eau lors des variations de température et d'humidité. Les calcaires et les grès calcaireux (calcarénite) sont les plus sensibles à l'action de l'eau. L'eau chargée de composants nuisibles (sels) peut remonter par capillarité, être introduite par les mortiers de maçonneries ou apportée par le vent si le matériau est situé à proximité de la mer (Chauffriat, 1999).

Le brouillard et la brume dégradent les bâtiments en déposant des particules liquides de chlorures de sodium, ainsi que des particules solides qui altèrent la forme et la couleur des revêtements (Pedro, 1993). L'hydrologie de la zone conditionne aussi la détérioration du bâti historique, ainsi que la présence de nappe phréatique par une importante humidification des bases des murs, ce qui peut occasionner d'importantes tensions dans les structures qui peuvent par la

suite provoquer la désagrégation des pierres monumentales (Muriel, 2000). Ce phénomène de remontée capillaire est résumé par Arnold et al., (1986) dans la figure 4.4 présentant les différentes zones observées sur un mur affecté par la remontée capillaire et montre un modèle d'évolution des systèmes salins basés sur les observations, la documentation et les analyses des surfaces de l'église de cuvent Mustair (Switzerland) : La zone A près du sol présente distinctement moins de détérioration que la zone B où la plupart des enduits, des mortiers et des pierres montrent une désintégration granuleuse, un décollement d'enduit de revêtement et une importante efflorescence saline. La zone C apparaît plus sombre et humide, cette zone peut atteindre plusieurs mètres de hauteur.

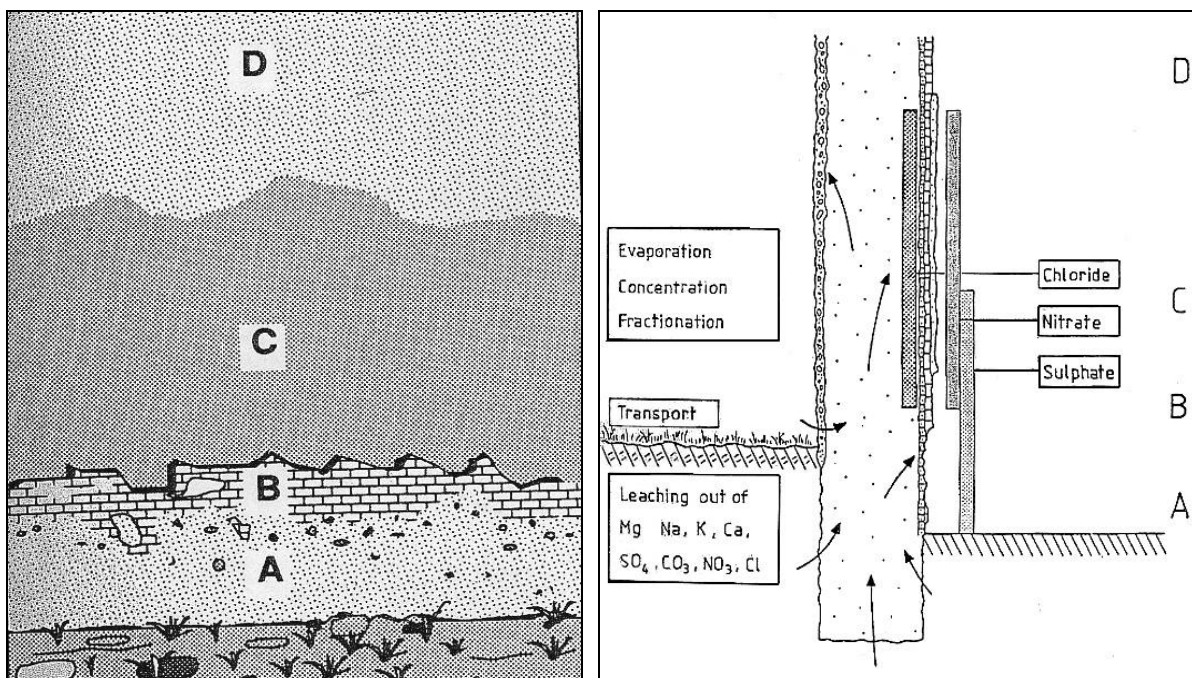


Fig.4.4 Les différentes zones observées dans l'air d'une remontée capillaire sur un mur, avec un modèle d'évolution des systèmes salins de la remontée capillaire basé sur les observations, la documentation et les analyses des surfaces de l'église de cuvent Mustair (Switzerland) par Arnold *et al.*, (1986).

On peut en conclure que l'action de l'eau appauvrit en liant (ciment ou matrice) les couches internes et enrichit les couches superficielles de la pierre, diminue la résistance mécanique de la pierre, mobilise d'autres agents de détérioration (sels

solubles), favorise la colonisation des organismes vivants, facilite le transport et distribution des polluants atmosphériques à l'intérieur de la pierre (Kowalski, 1966).

b- Action éolienne

Par son action mécanique, le vent contribue à l'effondrement des parties fortement érodées, et à l'accentuation des dégradations générées par l'eau, surtout au niveau des trous et des microfissures.

La présence du vent pendant les temps pluvieux crée de la pluie battante qui intensifie le phénomène d'infiltration de l'eau et transforme les microfissures en macro-fissures, et agrandi les trous d'érosion.

Le vent peut également causer de graves dommages par le fait qu'il soulève les poussières, le sable, et les projette à la surface de la pierre. Les pierres calcaires sont particulièrement sujettes à ce genre d'altération, surtout si elles sont abrasées par un matériau dur présentant des arêtes vives.

c- Action de la température

L'action de la température sur les pierres monumentales dépend de la conductivité thermique d'une pierre à une autre. La température crée des cycles d'évaporation–imbibition qui, en se combinant avec d'autres facteurs chimiques, crée des mouvements de contraction-dilatation qui peuvent engendrer des déformations dans la structure de la pierre causant ainsi son altération. (Rivas, 1996 ; Pedro, 1993). Il en résulte, après des dizaines d'années, une décohésion interne et un cisaillement entre les cristaux (Mamillan, 1999).

La calcarénite, comme toutes les roches, se dilate sous l'effet de la chaleur et se contracte sous l'effet du froid. Lorsque la dilatation et la contraction sont entrevasées, la pierre risque de se fissurer (Torraca, 1981 ; Arnold, 1989).

2- Facteurs biologiques

Les agents biologiques sont tout organisme capable de provoquer une altération sur la pierre. Ces organismes se trouvent généralement dans le sol. Parmi les

groupes de la systématique susceptibles d'altérer la pierre figurent les bactéries, les algues, les champignons, les lichens, les végétaux supérieurs et les animaux. Les microorganismes et les organismes vivants jouent d'ordinaire un rôle important dans certains processus géologiques fondamentaux : altération des roches, formation et transformation du sol et des sédiments, genèse et dégradation des minéraux. Lorsque certains de ces phénomènes se produisent sur des ouvrages de pierre monumentale, cela est manifestement nuisible. Ils causent une désagrégation et une transformation progressive de la pierre.

Ces altérations biologiques sont différentes en fonction des facteurs écologiques tels que le substrat, la nature des microorganismes impliqués et les caractéristiques de l'environnement du monument (microenvironnement, macroenvironnement, pollution atmosphérique). Souvent, ces altérations peuvent être clairement repérées et liées à la présence d'organismes vivants (patines d'algues de diverses couleurs, croissance de lichens et/ou de végétaux supérieurs). Dans d'autres cas, il est impossible de reconnaître à l'œil nu l'agent biologique responsable de l'altération et seuls les résultats des analyses (voir appendice) permettront de le déterminer.

a- Végétaux supérieurs

La présence de végétation induit des variations au niveau des paramètres microclimatiques. Elle permet une réduction de l'ensoleillement et du vent et par conséquent une diminution des échanges d'eau avec l'extérieur, et donc, des sels qui en résultent et de l'érosion éolienne. En revanche, la stagnation de l'eau s'accroît, de même que l'humidité ambiante. Parmi les espèces qui sont les plus nuisibles pour la conservation des murs et que l'on trouve dans une aire géographique relativement vaste, on trouve : le figuier (*Ficus carica* et les autres espèces du même genre), le câprier (*Capparis Spinosa*), le lierre (*Herda helix*), l'ailante (*Ailanthus altissima*), le robinier (*Robinia pseudacadia*). Des espèces comme le chêne, l'orme et le frêne peuvent aussi avoir un effet sur la pierre en tant que plantes rudérales. En somme, la présence d'une végétation croissant

directement sur les murs ou trop près d'eux est toujours nuisible pour les édifices historiques, malgré certains effets microclimatiques bénéfiques (ex. réduction de la pollution).

L'altération du substrat causée par la végétation peut être mécanique et/ou chimique :

- La poussée mécanique est exercée par la croissance et l'épaississement radial des extrémités racinaires. Les données expérimentales ont montré que leur pression moyenne est de l'ordre de 15 atm (Wenkler, 1975). Généralement, la pénétration dans le sol est impossible quand la résistance est supérieure à 25-30 Atm. Les racines tendent toutefois à pousser en exploitant les zones de moindre résistance (la couche de mortier). Des zones compactes peuvent aussi être pénétrées lorsqu'il y a une diminution de la cohésion due à l'action d'autres facteurs physico-chimiques d'altération comme la pluie ou le gel qui renforcent cette action par effet synergique.

- L'action chimique peut s'exercer selon deux mécanismes principaux : l'acidité des extrémités racinaires ou l'acidité et le potentiel chélateur éventuel des exsudats (Keller *et al.*, 1952). Les extrémités des racines absorbantes ont toujours une réaction acide due à leur propre charge négative, qui est compensée par une couche d'ions H^+ et d'autres cations. Cette acidité (pH moyen de 2 à 3,85) est responsable de la desquamation de particules minérales puisque les ions H^+ peuvent être remplacés par des cations en solution suivant la série lyotropique ($Ba^{++}>Mg^{++}>Cs^+>Rb^+>NH_4^+>K^+>Na^+>Li^+$). Le transfert de cations se fait à travers un réseau de particules colloïdales par un mécanisme d'échange au contact.

b- Les algues

Les algues sont souvent les premières à coloniser les substrats pierreux car, pour se développer, elles ont seulement besoin de lumière et de composés inorganiques. Généralement, la présence d'algues sur les pierres est reconnaissable à l'œil nu. Elles peuvent former des patines ou des couches

d'étendue, d'épaisseur, de consistance et de couleur variables. Les patines sont minces, dures, parfois vertes, mais généralement, grises ou noires dans les endroits bien éclairés et humides.

Les couches d'algues qui se développent sur la pierre captent l'eau, ce qui retarde l'assèchement ultérieur et accroît les dommages causés par l'eau au substrat. Par ailleurs, les particules de poussière, de résidus organiques, et d'autres substances qu'on trouve dans l'atmosphère polluée peuvent adhérer à ces patines. Ces particules augmentent les dégâts et fournissent en même temps un substrat riche en substances organiques, ce qui favorise la croissance d'autres organismes tels que les bactéries, les lichens, les mousses et les fougères.

Les altérations provoquées par les algues sont : des désagréments sous forme de poudre diversement colorés (blanc, rouge, gris clair) et les micro-cavités dues à la dissolution des carbonates (l'action des algues endolithes). Les algues sont également responsables de la formation des couches noires sur les calcaires par leurs chlorophylles et leurs caroténoïdes.

c- Les champignons

La contribution des champignons dans la dégradation de la roche monumentale est liée surtout à leur action chimique. Les champignons peuvent produire les acides tels que: l'acide carbonique, l'acide nitrique, l'acide sulfurique et les acides organiques (citriques, gluconiques, lactiques...) dont l'acide oxalique reste le plus redoutable (Krumbein, 1992). Les acides organiques peuvent dissoudre les calcaires, les minéraux silicatés (notamment le mica, l'orthoclase,...), les minéraux contenant du fer et du magnésium (biotite, olivine, pyroxène,...) et divers phosphates.

d- Les lichens

Les lichens, association symbiotique de champignons et d'algues, agissent chimiquement sur le calcaire selon trois processus chimiques: la production d'acide carbonique ; l'excrétion des acides oxaliques ; et la production des composés lichéniques.

Les lichens peuplant de nombreux endroits des façades des monuments historiques, sont de nature diversifiée. Ils se présentent souvent sous forme de croûtes de couleurs variées (blanche, jaune, grise, noire) adhérant intimement au support, ou aussi sous forme furticuleuse, foliacée, ou à mince tigelles. Ils sont alors souvent confondus avec les mousses (Adam, 1983).

Lorsqu'une surface de la pierre monumentale est occupée par des lichens, elle finit par avoir une structure si tourmentée creusée d'alvéoles et traversée de sillons. En outre, les thalles lithiques, une fois mouillées, puis séchées, exercent, par contraction et expansion thermique, une force physique sur les surfaces (Caneva & Salvadori, 1988). Le développement des lichens sur le calcaire est très fréquent à l'extérieur des pierres, cependant, beaucoup d'entre eux ne peuvent pas vivre dans une atmosphère polluée (Torraca, 1986).

e- La faune

La faune, principalement les pigeons, les goélands, les corbeaux, les grives, les étourneaux, les moineaux peuvent causer des dégâts directs ou indirectes au calcaire et au marbre. L'action destructrice de ces oiseaux est de nature à la fois mécanique et chimique.

- L'action mécanique : résulte de piétinement et des poussées. Par ces gestes, les avifaunes peuvent abîmer les éléments qui manquent de cohésion.

- L'action chimique : causée principalement par les excréments qui contiennent de l'azote (organique ou inorganique), des phosphates, du potassium, du sodium et du calcium (Caneva & Salvadori, 1988).

On rencontre plus fréquemment les effets de l'action chimique notamment l'acide urique qui est un composé de l'azote et certains acides comme l'acide phosphorique (H_3PO_4) et l'acide nitrique (HNO_3) qui desquament la roche et réagissent avec les carbonates pour former des phosphates $[Ca_3 (PO_4)_2]$ et des nitrates $Ca(NO_3)_2$ causant une action corrosive.

Ainsi, les excréments sur la pierre favorisent le pullulement des micro-organismes (Decrouez, 1992). Cela veut dire que les substances organiques

servent de substrat nutritif pour la microflore hétérotrophe comme les bactéries et les champignons.

f- Les bactéries

Les bactéries tirent l'énergie nécessaire à leur activité vitale des réactions chimiques et minérales de la pierre ce qui provoque la corrosion de calcaire. Parmi les bactéries qui interviennent aux réactions chimiques figurent les bactéries autotrophes du cycle de soufre et les bactéries du cycle d'azote (Torraca, 1986).

Les thiobactéries utilisent le soufre ou ses divers composés réduits pour produire des ions sulfate (SO_4^{2-}) qui, lorsqu'ils réagissent avec les ions Ca^{++} du calcaire forment le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Par contre, les thiobacillus peuvent intervenir pour la réduction des sulfates en sulfures.

En outre, les bactéries nitrifiantes dites aussi bactéries de cycle d'azote, attaquent le calcaire qu'elles utilisent comme source de carbone pour produire des acides nitreux et nitriques (qui se trouvent dans l'atmosphère polluée), pour transformer la surface finalement en de poudre (nitrate de calcium et gypse).

Le tableau 4.6 présente les principales formes d'altérations d'origine biologiques de la roche monumentale selon l'espèce biologique.

Organismes	Altération
Bactéries autotrophes	Coûte noire, patine brune à noire, exfoliation, désagrégation
Bactéries hétérotrophes	Coûte noire, patine noire, exfoliation, décoloration
Actinomycètes	poudre blanchâtre à grise, patines, efflorescence blanchâtre
Cyanobactéries	Patines et exfoliation de différentes couleurs et consistance
Champignons	Tâches colorées, exfoliation et alvéole
Algues	Patines et exfoliation de différentes couleurs et consistance
Lichens	Croûtes, tâches et alvéole
Mousses et hépatiques	Décoloration, tâches vertes à grises
Végétaux supérieurs	Fissures, désagrégation et détachement du matériel

Tab. 4.6 Les altérations biologiques de la roche monumentale selon l'espèce biologique (Kumar *et al.*, 1999)

3- Facteurs humains

a- Restaurations inadaptées

La restauration des constructions historiques est une opération très délicate dans la mesure où elle peut aggraver l'état de maçonnerie, ceci peut être dû à une interaction négative entre les matériaux employés dans la restauration et certains des composants présents dans la maçonnerie du fait de leur incompatibilité (Spweik, 1997).

Depuis quelques années, l'enceinte de Salé est en pleins travaux de restauration sous la supervision de l'inspection des monuments historiques. Ainsi, plusieurs chantiers ont été ouverts aux alentours de l'enceinte.

On a constaté qu'après quelques mois de restaurations, il y a apparition des formes d'altération plus aggravées que les antérieures. Elles se manifestent au début par des boursouffures (Fig.4.5), des tâches d'humidité, et des changements de couleur. Après, on observe un détachement d'enduit de revêtement, ce qui fragilise de plus les pierres sous-jacentes. Ceci est due au fait que le mortier subit souvent l'effet d'une fermentation hâtive sur son degré d'adhésion, à une mauvaise qualité du sable, de la chaux, au non respect des doses dans le mélange ou à une teneur insuffisante en eau. La qualité médiocre des enduits avec une teneur en sable plus élevée favorise l'action destructive de l'eau accentuée par le manque d'entretien.

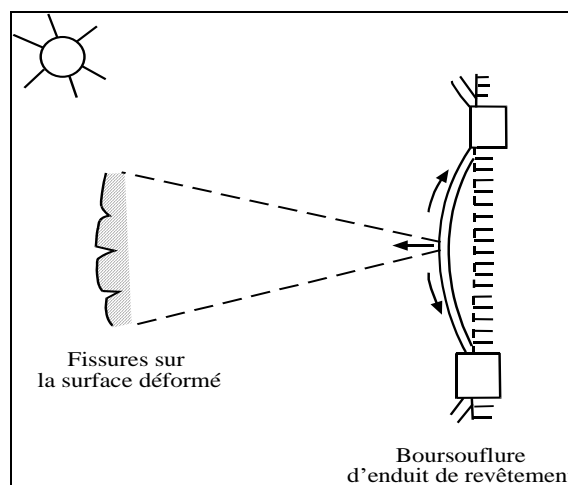


Fig.4.5 Déformation de revêtement

b- Action des facteurs mécaniques

Il s'agit essentiellement des vibrations, des chocs qui sont souvent à l'origine des dégradations par abrasion, fissuration ou corrosion de la pierre.

Les raccords en fer (chevilles, boulons d'ancrage) lorsqu'ils se corrodent augmentent de volume (rouille) et engendrent une pression sur les parois voisines du scellement, ce qui entraîne des fissures multiples dans la pierre.

c- Action des charges

Plusieurs facteurs influents sur la résistance mécanique des éléments ou objets en pierre, on peut noter principalement :

c-1 Sens de pose de la pierre

La pose des roches sédimentaires dans une construction doit tenir compte de l'orientation du lit. La cohésion des pierres calcaires est plus faible sous l'action des forces exercées parallèlement au lit de stratification naturelle. Suivant la nature des pierres, cette différence de résistance entre la cohésion perpendiculaire ou parallèle au lit est plus ou moins marquée. Il est indispensable que l'action des contraintes s'exerce perpendiculairement au sens de stratification naturelle.

Les pierres posées verticalement en délit peuvent, sous l'action des charges ou sous l'effet des pénétrations d'eau et du gel, subir une séparation en feuilles ou en plaques.

En ce qui concerne les dalles de revêtement du sol, certaines roches trop poreuses placées à l'extérieur, ou de trop faible cohésion entre les stratifications, posées parallèlement à la surface du revêtement se détruisent progressivement par une sorte d'érosion sous l'effet de l'action de l'eau. Le choix de la roche utilisée n'est pas adapté à cette fonction.

c-2 Jointoiement des blocs

Le mauvais remplissage des joints ou la mauvaise qualité du mortier réduit la résistance du matériau constituant le mur. L'assemblage des éléments en pierre s'effectue dans les constructions par la création de joints de liaisons entre les

pierres, qui sont remplis au mortier à base d'un liant. Si le joint n'est pas rempli complètement ou sa qualité de collage ou de cohésion est trop faible, les tensions transmises d'une pierre à une autre ne sont pas uniformes. La concentration de contraintes en certains points de la pierre se produit et peuvent entraîner des fissures et des ruptures des pierres.

d- La Pollution atmosphérique

Le développement des activités industrielles et de population ont provoqué, dans certaines zones urbaines, une émission massive dans l'atmosphère de substances qui naturellement n'existaient qu'en très faible concentration. Actuellement, il est couramment admis que la pollution atmosphérique joue un rôle prépondérant dans le processus de noircissement et de sulfatation des façades (DRIDE centre, 2001). En effet, les polluants qui jouent un rôle dans la détérioration de la pierre sont : les oxydes d'azote, l'ozone, les composés sulfureux (dioxyde de soufre, sulfure d'hydrogène, les aérosols, et les brouillards sulfatés), les chlorures d'hydrogène, et les gaz carboniques (Fassina, 1988). La nature et la qualité des polluants sont aussi une fonction des conditions atmosphériques et la topographie influent beaucoup sur la stagnation et le transport des polluants. Ces polluants agressent les bâtiments suivant deux modalités principales : la dissolution des roches par l'acidité de l'air et le noircissement des façades par les poussières et les particules. La sensibilité des matériaux à ces agressions varie suivant leur nature (Chauffriat, 1999).

Pour les pierres calcaires exposées à l'extérieur, les agents polluants les plus dangereux sont le dioxyde de soufre et le trioxyde d'azote qui se transforment par oxydation et hydrolyse en acide sulfurique et nitrique. Ces composés, qui sont des acides puissants, ont un effet destructif sur les minéraux composant les roches. Ils entrent facilement en réaction avec les carbonates en les décomposant. Les pierres calcaires et les grès au ciment calcaire sont les roches les plus sensibles.

N.B: la pollution par l'urine humaine est largement observée sur plusieurs parties des murailles de l'enceinte de Salé.

Une fois émis dans l'atmosphère, les polluants gazeux et particulaires subissent deux destinations. D'une part, ils peuvent être déposés tels quels sur les surfaces (sol, bâtiments, végétaux); c'est le processus de dépôt sec. D'autre part, ils peuvent réagir entre eux ainsi qu'avec la vapeur d'eau des nuages. Les nombreuses transformations physico-chimiques qui se produisent dans l'atmosphère en phase gazeuse, liquide et solide ont pour effet de mélanger les gaz et les particules émis au départ par des sources bien distinctes, et aboutissent à la formation d'une grande variété de composés tels que l'ozone, divers sulfates, des sels d'ammonium et des acides. Ces nouveaux composés se déposent sur les surfaces par voie sèche ou par voie humide après incorporation dans les précipitations (pluie, neige, brouillard) (Fig.4.6). La Figure 4.7 indique les principales transformations physiques que peuvent subir les particules dans l'atmosphère : coagulation, diffusion, condensation, réaction gaz-particule, dépôt sec par sédimentation, et incorporation dans les précipitations (Manahan, 1991). La composition du dépôt humide dépend de la solubilité et de la concentration des polluants, et des caractéristiques des précipitations (nature, fréquence, intensité, efficacité d'incorporation...) (Fally, 1999).

Le dépôt sec est fonction des conditions météorologiques (température, humidité, vent), des propriétés de la surface de dépôt (texture, humidité, orientation, inertie thermique et chimique,...), et des caractéristiques physico-chimiques des composés eux-mêmes (état gazeux/particulaire, morphologie et dimension des particules, réactivité chimique, solubilité).

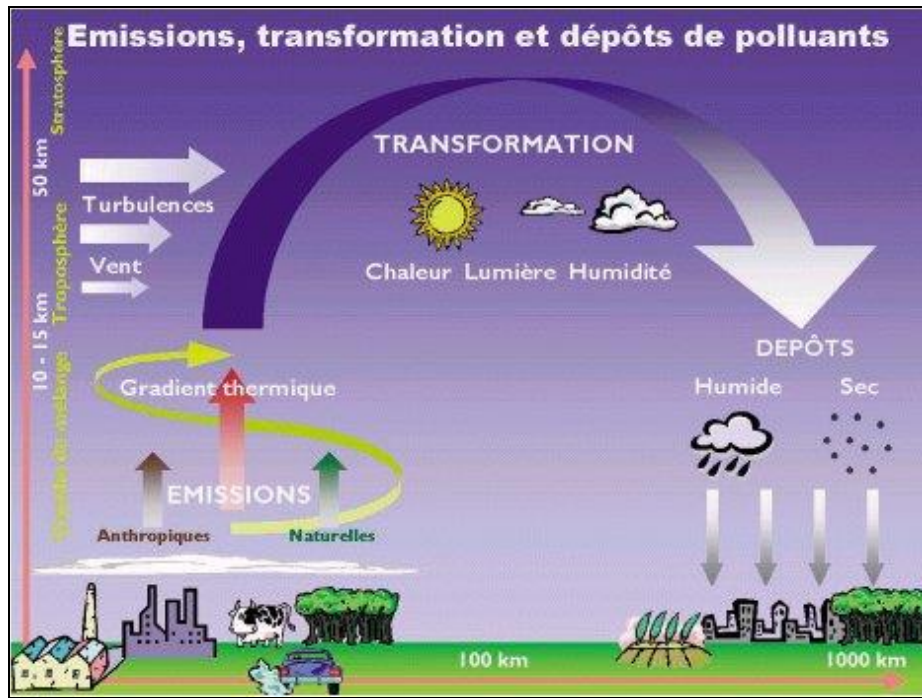


Fig. 4.6 Cycle atmosphérique schématique des polluants. Une fois émis, les gazes peuvent être soit transportés dans la stratosphère (Guidotti & Pithon, 2019)

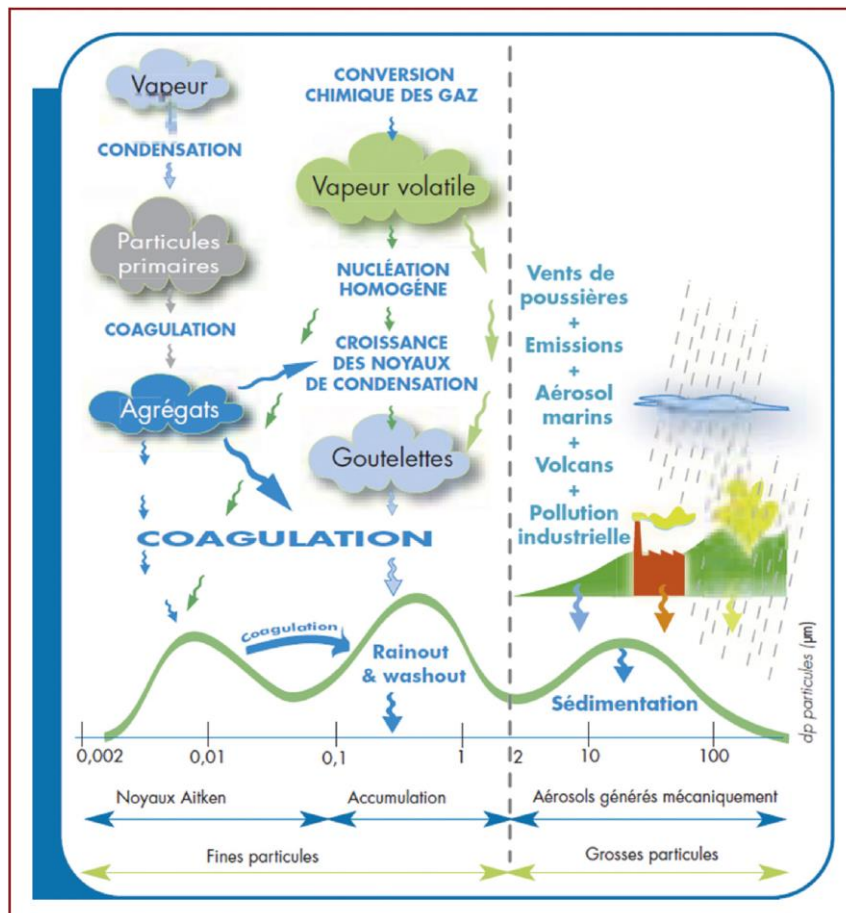


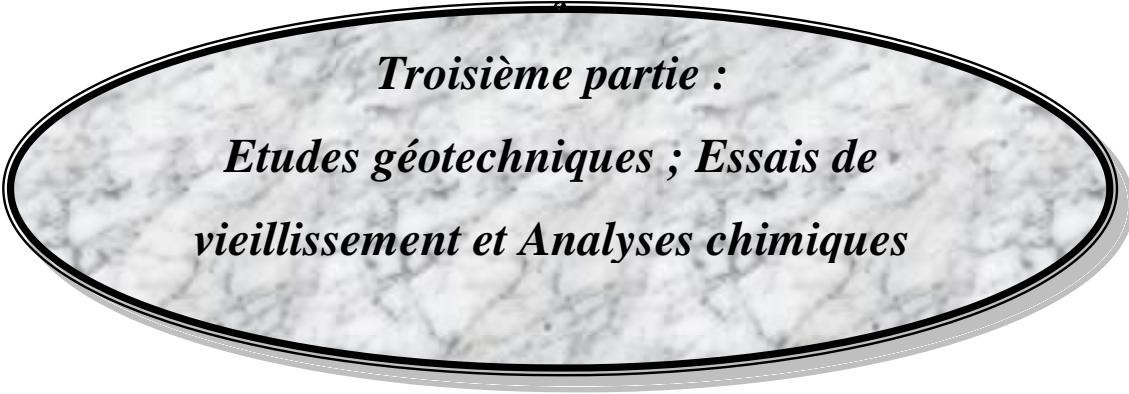
Fig. 4.7 Transformations physiques des particules dans l'atmosphère (Revue des Maladies Respiratoires (2016) 33, 484—508)

En résumé, pendant que des nouvelles particules et de nouveaux gaz sont sans cesse produits et se modifient, les particules et les gaz déjà présents dans l'atmosphère sont continuellement éliminés par une grande variété de processus secs et humides. En ce qui concerne les précipitations acides qui altèrent les bâtiments, elles sont formées par la transformation du dioxyde de soufre (SO_2) et des oxydes d'azote (NO_x) gazeux en aérosols : l'acide nitrique et sulfurique (HNO_3 et H_2SO_4), après une série complexe de réactions qui diffèrent en situation de ciel clair (H_2O sous forme de vapeur) ou de ciel nuageux (H_2O sous forme liquide) (Fally, 1999).

V- Conclusion

L'étude générale des pathologies affectant les pierres monumentales, que nous venons d'énumérer, nous a permis de constater que les dégradations sont liées à divers facteurs, principalement, les facteurs naturels (eau, vent et température), facteurs biologiques (végétaux supérieurs, algues, champignons, lichens, faune,...) et des facteurs humains (pollution atmosphérique, restaurations inadaptées). Ces formes de dégradations se manifestent par des processus chimique, physiques ou biologique qui peuvent provoquer l'affaiblissement de la roche en liant (désagrégation), l'enrichissement de la surface externe de la roche (encroûtement), colonisation par des végétaux, formation des substances exogènes à l'intérieure de la roche.

Ces divers facteurs, ainsi que la qualité intrinsèque de la roche, et son utilisation plus ou moins judicieuse, déterminent directement la durabilité du matériau. En conséquence, nous ne parviendrons à conserver les remparts qu'en déterminant les principaux agents agressifs responsables de cette altération et d'essayer de délimiter leur action néfaste sur la pierre.



Troisième partie :
Etudes géotechniques ; Essais de
vieillissement et Analyses chimiques

Chap. 5: Etude du matériel pierreux par essais géotechniques et essais de vieillissement

I- Introduction

La sauvegarde des monuments historiques est une opération plus que nécessaire, qui exige le plus souvent la reconstitution et/ou la restauration d'une ou plusieurs parties de ces monuments. Pour expliquer les différentes formes d'altération de la pierre monumentale de Salé (calcarénite) et intervenir ainsi efficacement dans le choix des traitements de restauration ou des pierres de substitution, il faut d'abord faire une étude détaillée du monument comportant des analyses physico-chimiques et géotechniques de la roche, de l'environnement d'exposition, des conditions de mise en œuvre ainsi que l'influence du mortier ou liant de maçonnerie. Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés à la pierre monumentale des remparts de Salé. Nous nous sommes attachés à expliquer les formes d'altération les plus généralisées et qui représentent une menace pour la conservation du monument. Les observations sur le terrain des formes d'altération nous ont facilité le repérage d'échantillons sur les remparts de l'enceinte de Salé. Ensuite, on va prélever des échantillons des matériaux de construction et des formes de dégradations afin d'analyser la composition chimique, la microstructure de chaque échantillon et effectuer des essais au laboratoire et d'essayer d'interpréter les résultats obtenus pour délimiter les principales causes d'altération dans notre site d'étude. Les connaissances apportées par l'étude des propriétés pétrophysiques des pierres associées à l'analyse au laboratoire de ces prélèvements, nous a permis de déduire et de détailler les différents modes et mécanismes d'altération par les aérosols atmosphériques et marins.

II- Caractéristiques pétrographiques de la roche saine et de la roche altérée

Les pierres ont existé depuis presque mille ans, placés dans l'environnement normal pendant longtemps, ils sont détériorés par action

physique, par des agents chimiques et par les interventions des êtres vivants (homme, végétaux et microbes). Actuellement, le taux et le degré de cette dégradation ont augmenté avec le développement rapide des tissus urbain et industriel des villes.

Dans l'étude de l'altération de la pierre monumentale, on doit tenir compte de la composition de la roche (grains, ciment, texture), de microclimat d'exposition, des caractères physiques (porosité globale, résistance à la compression, capillarité), ainsi que des caractères chimiques de la pierre.

1- Roche saine

Les pierres monumentales calcarénitiques de Salé sont de provenance des carrières locales de la ville de Salé notamment les carrières de Bouknadel (nord-est de Salé). C'est une calcarénite dunaire et marine d'âge Plio-Quaternaire qui affleure largement le long de la côte atlantique entre Kénitra et El jadida. Ces caractéristiques géotechniques sont très variables. Elles sont contrôlées par les propriétés sédimentologiques des différents dépôts et surtout par les processus diagénétiques qu'elles ont subit après leur mise en place. Le degré de cimentation de la calcarénite est variable d'un site à l'autre, d'un niveau sédimentaire à l'autre et même au sein du même niveau sédimentaire. Ce degré de cimentation induit à la roche des spécifications de dureté variable.

Ces calcarénites regroupent les calcaires au sens large, à savoir les calcaires coquilliers et les roches grés-calcareux. Les grés-calcareux, les plus utilisés, se caractérisent par une porosité assez élevée et une dureté moyenne. La taille moyenne des éléments constituant de la calcarénite est de 0,8mm et le degré de porosité est de 5,49 à 25,92% (Fig.5.1).

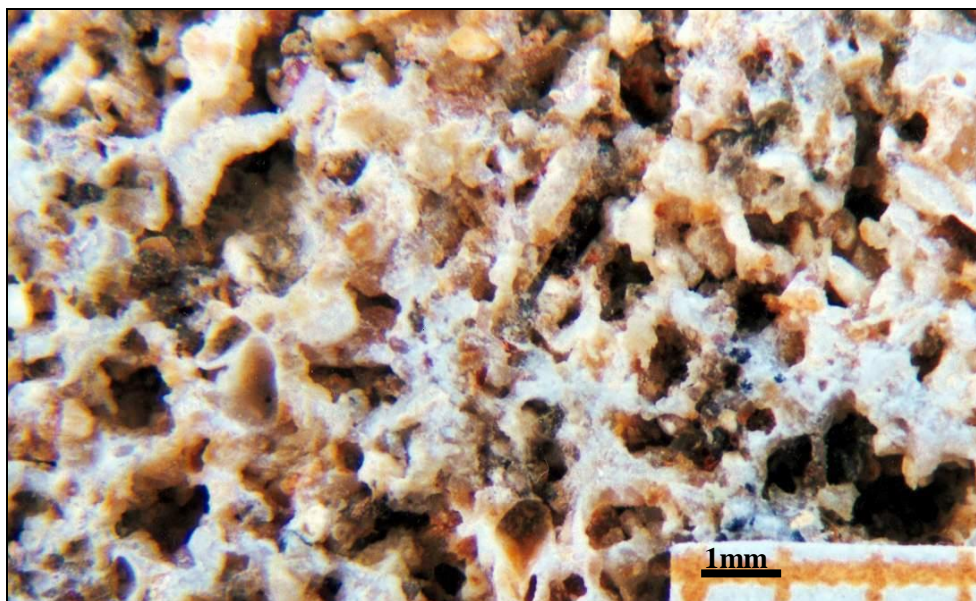


Fig.5.1.Roche de Bouknadel vue par la loupe binoculaire (Obj.4)

La structure de la pierre joue un rôle très important dans la dégradation et l'altération. La structure entrecroisée de la calcarénite dunaire favorise l'altération avec un départ massif de la matière supérieur à celui des calcarénite à laminations horizontales. Le risque de la dégradation augmente de 10 à 80 mm/siècle, avec le sens de l'orientation de la stratification par rapport au mur (Bellitir, 1998). D'après l'essai de mesure de la vitesse d'altération de la calcarénite exploitable comme pierre de taille, cette vitesse est estimée à 7,95 mm/siècle (Bellitir, 1998).

2- Roche altérée

Le matériel calcarénitique de la pierre monumentale de Salé présente une grande variété de propriétés pétrophysiques. Ces pierres calcarénites utilisées sont grisâtres à jaunâtres avec des inclusions de coquilles fossilisées. L'étude pétrographique de quelques échantillons de pierre monumentale montre une composition minéralogique riche en quartz avec la présence des bioclastes, des éléments ferrugineux et des éléments détritiques, le liant est une microsparite. La porosité est variable d'un échantillon à un autre.

Cette calcarénite a une composition minérale, une morphologie, et une texture similaire au grès calcaire du Plio-Quaternaire des formations

géologiques proches de Salé. En général, le type ornemental dominant est une calcarénite grise qui se caractérise par : (i) une calcite sparitique; (ii) une abondance de bioclastes; (iii) la présence de pelloïdes, des minéraux opaques, du feldspath potassique et du plagioclase; (iv) une fraction détritique avec des grains grossiers à moyens avec 10 à 30% de quartz ; et (v) une porosité importante. Les grains détritiques ne sont pas en contact, indiquant une faible diagenèse et facilitant la présence de porosité. Ces calcarénites se caractérisent par une composition chimique dominée par CaCO_3 et une porosité élevée.

La surface des pierres présente généralement des encroûtements de quelques millimètres d'épaisseur. Ces encroûtements se caractérisent par une consistance plus ou moins dure, un aspect noduleux ou dendritique, de couleur noire à grise, et une composition chimique différente de la pierre sous-jacente avec une précipitation de SO_3 et une diminution de la teneur en CaO par rapport à la roche d'origine (voir paragraphe analyse chimique). A l'échelle microscopique, ces encroûtements modifient la texture de la pierre sous-jacente en la rendant moins poreuse avec des cristaux peu individualisés (Fig.5.2).

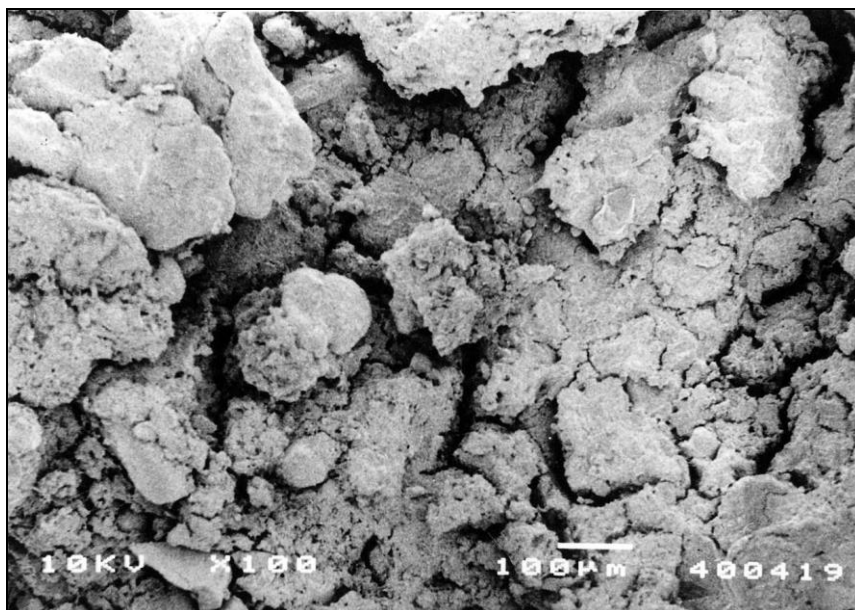


Fig.5.2 Aspect de la croûte noire d'une pierre altérée (pierre de Bab Mrisa) vue au microscope électronique à balayage (MEB).

III- Essais géotechniques et essais de vieillissement

1- Introduction

L'importance des pierres calcarénitiques dans les remparts historiques de la médina de Salé nous a incité à présenter les caractères géotechniques de ce matériau. Ainsi, on a établi dans un premier temps des essais géotechniques afin d'évaluer le degré de compatibilité entre les pierres altérées et les pierres de carrières utilisées actuellement dans les opérations de restaurations. Dans un deuxième temps, une série des essais de vieillissement artificiels (cristallisation des sels et corrosion par les acides) a été appliquée pour approfondir les connaissances sur les processus de détérioration des pierres. Enfin, des analyses chimiques vont être entamées afin de définir la minéralogie et la composition des matériaux de construction, et de déterminer les causes responsables de l'état déplorable de l'enceinte.

2- Techniques employées

Pour les essais géotechniques, on a appliqué les protocoles expérimentaux selon les normes suivantes : la norme française NF B 10-503 /73 pour l'essai de porosité; la norme UNE 22-175-85 pour l'essai de la résistance à la compression et la norme italienne Normal 11/85 pour l'essai de capillarité.

Pour les essais de vieillissement artificiels, on a appliqué les protocoles expérimentaux selon les normes italiennes (Italien Normal Procédures CNR, ICR) (Alcalde et Martin, 1990).

La caractérisation chimique des produits d'altération, des pierres, des enduits et des mortiers altérés, des pierres de carrières ainsi que des matériaux de restauration permet de déterminer les éléments majeurs, les sels solubles ainsi que les principaux constituants minéralogiques. On a utilisé la Fluorescence aux Rayons X (FRX) pour la détermination de la composition chimique des échantillons étudiés. Pour la détermination de la microstructure des pierres, on a utilisé la Microscopie Electronique à Balayage (MEB), et pour la détermination de la composition minéralogique des phases cristallisées, on a eu recours à la

Diffraction aux Rayons X (DRX). Les ions des sels solubles et les métaux lourds sont déterminés respectivement par la Chromatographie Ionique (CI) et par la Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).

a- Fluorescence aux rayons X (FRX)

La Fluorescence aux rayons X (FRX) est une technique d'analyse élémentaire. Elle est utilisée pour l'analyse de la composition chimique des matériaux minéraux (céramiques, verres, glaçures, pierres,...). Du fait de leur énergie importante, les photons X vont arracher des électrons situés au cœur des atomes, près du noyau, l'atome se retrouve, donc, ionisé. Un électron d'une couche périphérique va venir combler la place de l'électron projeté. Cet électron va perdre de l'énergie, qui va être émise sous la forme de photon (rayons X) d'une énergie propre, et donc, caractéristique. C'est le phénomène de «fluorescence».

Nous avons utilisé un Spectromètre de Fluorescence X à Dispersion de Longueur d'ondes. C'est un spectromètre séquentiel avec un canal de mesure basé sur un seul goniomètre couvrant la gamme complète de mesure (de Be à U). Le spectromètre est contrôlé par un microprocesseur pour un maximum de souplesse et l'ensemble du système est contrôlé par un ordinateur extérieur avec un logiciel d'analyse. En plus, l'appareil est doté d'un passeur d'échantillons automatique programmable.

L'analyse est effectuée sur des pastilles de poudre compressée préparées à partir d'un mélange de 2g d'échantillon finement broyé avec 4g d'acide borique H_3BO_3 . La pastille est obtenue à l'aide d'une Presse Hydraulique manuelle TP 20. Cette technique élimine les effets de variation de granulométrie, les effets de surface et les effets minéralogiques. La surface analysée varie de 20 cm^2 à 0,2 cm^2 .

b- Microscope électronique à Balayage (MEB)

Cette technique permet l'étude de la micromorphologie, la microtexture tridimensionnelle de la pierre, la porosité et la composition chimique. Le

microscope électronique à balayage utilise un faisceau très fin qui balaie point par point la surface de l'échantillon. L'interaction du faisceau électronique avec l'échantillon sous l'impact du faisceau des électrons accélérés, des électrons rétrodiffusés et des électrons secondaires émis par l'échantillon sont recueillis sélectivement par des détecteurs qui transmettent un signal à un écran cathodique dont le balayage est synchronisé avec le balayage de l'objet. La source des électrons est un filament de tungstène, chauffé par une différence de potentiel.

L'appareil est utilisé dans les conditions environnementales en Mode ESEM (0,1mbar-1,33mbar) de résolution 3,5nm à 30KV. Ce mode supprime totalement les effets de charges et permet l'observation de l'échantillon non-conducteur sans aucune préparation. Il est équipé d'un système complet de microanalyse-X (détecteur EDX-EDAX) et d'un détecteur des électrons rétrodiffusés, permettant de donner la composition chimique de son échantillon avec une limite de détection allant jusqu'au Bore.

c- Chromatographie ionique (CI)

La chromatographie ionique en phase liquide (CI) permet l'identification et la quantification simultanées de divers ions (cations et anions) inorganiques et organiques. Le principe de la technique repose sur les différences d'affinité des ions pour un substrat fonctionnalisé (la résine échangeuse d'ions) en présence d'une phase liquide porteuse (l'éluant). La chromatographie ionique utilisée est un instrument Dionex 200 équipé d'une pompe à gradient pour la régulation du débit de l'éluant, d'un conductimètre et d'un passeur automatique des échantillons.

Pratiquement, quelques millilitres d'échantillon préalablement mis en solution par des techniques appropriées sont injectés au travers d'une colonne contenant la résine échangeuse d'ions. L'analyse des anions solubles : Cl^- , NO_3^- , et SO_4^{2-} , Na^+ et K^+ nécessite la préparation des étalons de 5, 10, 20, 30 et 100ppm et une solution de 5ml d'échantillon.

d- Spectrométrie d’Absorption Atomique (SAA)

La spectrométrie d’absorption atomique est une méthode d'analyse élémentaire, elle étudie les émissions ou absorptions de la lumière par l'atome libre, c'est à dire lorsque celui-ci voit son énergie varier au cours de passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre. Elle permet d'atteindre des limites de détection très basse, et également, vu son caractère destructif qui consiste à transformer l'échantillon sous forme liquide, d'analyser des échantillons biologiques et environnementaux complètement dissous et homogènes allant jusqu'aux concentrations en ppb.

Avant d’analyser l’échantillon, on établit une courbe d’étalonnage qui exprime l'absorbance en fonction de la concentration de l’élément à déterminer à partir de quelques solutions étalons de concentrations connues. L’utilisation de cette courbe permet de déterminer la concentration d’un échantillon inconnue à partir de la mesure de l'absorbance. Nous avons utilisé dans notre étude l’appareil de type SPECTRAA 220 FS de Varian.

e- Diffraction aux Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. La méthode permet ainsi clairement de distinguer les produits amorphes des produits cristallisés.

L’instrumentation dans notre cas utilise le montage de BRAGG–BRENTANO, elle est de marque Philips X'Pert PRO qui dispose d'un goniomètre vertical de configuration θ - θ avec codage optique direct permettant la lecture directe de la position angulaire sur les bras du goniomètre et d'avoir une remarquable précision angulaire absolue de 0.0025° ainsi qu'une reproductibilité inférieure à 0.0001° .

Le faisceau de rayons X émis par le tube est limité par une fente de divergence afin de contrôler la surface irradiée de l'échantillon situé au centre du goniomètre. Le faisceau est focalisé par une fente réceptrice placée devant le détecteur qui enregistre l'intensité. Les Rayons X collectés par le détecteur sont convertis en impulsions électriques qui permettent de tracer les diagrammes de l'intensité du rayonnement diffracté en fonction de l'angle de diffraction ($I=f(2\theta)$) qui sont la base de l'analyse. Le diffractomètre est équipé d'un tube à rayons X avec anti-cathode en cuivre, d'un port échantillon tournant combiné à un passeur automatique, ainsi qu'un détecteur X'celerator associé à un monochromateur secondaire. La méthode nécessite seulement que 30 à 50mg de poudre d'échantillon. Elle permet d'identifier les phases cristallines présentes dans une poudre de roche.

3- Etude des propriétés géotechniques des matériaux sains et altérés

On va essayer de déterminer les différentes caractéristiques de la pierre monumentale et son mode de dégradation en relation avec les conditions physico-chimiques environnantes. Pour cela, on a réalisé des essais géotechniques afin d'évaluer la compatibilité entre les roches monumentales altérées (M) et les pierres de carrières utilisées actuellement dans les opérations de restauration (C). L'échantillonnage des sites originaux d'extraction (carrières Bouknadel) permet de caractériser la roche saine, les échantillons altérés en œuvre proviennent de différents remparts de l'enceinte de Salé.

a- Protocoles et résultats des essais géotechniques

Une série des essais a été effectuée sur 12 échantillons (M_1 à M_{12}) des pierres extraites des façades externes de l'enceinte (pierre altérée) rejetées lors des opérations de restauration et 12 échantillons (C_1 à C_{12}) de pierres extraites des carrières Bouknadel (pierre saine). Les échantillons qui ont fait l'objet de ces essais ont été taillés en forme cubique. Nos essais ont porté sur :

- la masse volumique apparente;
- la porosité et la masse volumique absolue;

- la résistance à la compression;
- la capillarité.

a1- La masse volumique apparente

La mesure du volume et de la masse de chaque échantillon nous a permis le calcul de la masse volumique apparente (Tab. 5.1) suivant la relation :

$$\gamma_{\text{app}} \text{ (g/cm}^3\text{)} = M_s / V$$

Avec:

M_s : la masse de l'échantillon en gramme

V : le volume de l'échantillon

Echantillon	M_s (g)	V (cm ³)	γ_{app} (g/cm ³)
M_1	636	425	1,50
M_2	792	476	1,66
M_3	997	524	1,90
C_1	901	443	2,03
C_2	522	324	1,61
C_3	965	438	2,20

Tab. 5.1 Masse volumique apparente des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)

Les valeurs moyennes des masses volumiques apparentes des roches altérées et des roches saines sont respectivement 1,68 (g/cm³) et 1,95 (g/cm³).

a2- La porosité et la masse volumique absolue

La porosité d'une roche est une grandeur mesurable, exprimée en%, elle est définie comme le rapport du volume des vides sur le volume total de l'échantillon. Cette mesure ne s'effectue que de manière indirecte et repose sur la saturation du volume poreux de l'échantillon par un fluide mouillant, comme l'eau, ou non mouillant, comme le mercure. Dans cette étude, on a utilisé l'eau,

suivant le protocole décrit par la norme française NF B 10-503 (1973) : après avoir passé les échantillons à l'étuve pendant 24 heures sous une température de 60°C, et les avoir pesé à sec (M_s), on les a immergés dans un bac d'eau pendant 24 heures jusqu'à saturation (M_{sat}). La porosité est donnée par la formule :

$$n = (M_{sat} - M_s) / (V \times \gamma_w)$$

γ_w étant la masse volumique de l'eau ($\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$).

La masse volumique absolue dépend de la nature minéralogique des constituants, elle est fonction de la porosité et la masse volumique apparente (tab. 5.2) :

$$\gamma_{abs} = \gamma_{app} / (1 - n)$$

Echantillon	V (cm ³)	M _s (g)	M _{sat} (g)	n (%)	γ _{abs} (g/cm ³)
M ₄	502	812	998	37	2,57
M ₅	538	744	953	39	2,26
M ₆	697	902	1206	44	2,30
C ₄	462	894	988	20	2,43
C ₅	408	598	754	38	2,37
C ₆	422	886	995	26	2,83

Tab. 5.2 Porosité et Masse volumique absolue des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)

D'après le tableau 5.2, la porosité moyenne et la masse volumique absolue moyenne sont respectivement de 40% et 2,38 (g/cm³) pour les roches altérées et de 28% et 2,5 (g/cm³) pour les roches saines.

a3- Résistance à la compression

L'essai de compression selon la norme UNE 22-175-85 a porté sur 6 échantillons (Tab 5.3). La résistance à la compression est donnée par la relation :

$$\sigma = F/S$$

Où F est la charge maximale par la presse qu'admet l'échantillon, exprimée en Kg, et S la moyenne des surfaces supérieures et inférieures en cm².

Echantillon	S (cm ²)	F (Kg)	σ (bars)
M ₇	44,58	1680	38
M ₈	45,72	1670	37
M ₉	40,56	1700	42
C ₇	50	2160	43
C ₈	48,96	1930	39
C ₉	42,4	2020	48

Tab. 5.3 Résistance à la compression des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)

La résistance moyenne à la compression des roches altérées est de 39 bars, alors qu'elle est de 43 bars pour les roches saines.

a4- Capillarité

L'absorption capillaire, qui est la pénétration de l'eau dans un mur en pierre, s'effectue par deux cheminements possibles :

- 1- La remontée d'eau verticale par capillarité,
- 2- La migration capillaire horizontale à partir d'un parement de mur exposé à la pluie fouettante ou ruisselante.

L'essai consiste à placer l'échantillon dans un récipient d'eau et après un certain temps, on mesure la masse d'eau absorbée en fonction du temps par une éprouvette cubique immergée dans 2mm d'eau (Normal 11/85), la capillarité est calculée à partir de la relation suivante :

$$C = 100 \times M / (S \times \sqrt{t})$$

Avec :

M : la masse d'eau absorbée

S : section de la face de contact

t : temps depuis l'origine

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau 5.4 : La capillarité moyenne des roches altérées est de 102,80% et de 81% pour les roches saines.

Echantillon	S (cm ²)	M (g)	T (s)	C (%)
M ₁	75	108	50	131,45
M ₂	52	64	40	100,49
M ₃	63	59	40	76,47
C ₁	91, 2	67	50	79,37
C ₂	78,4	56	70	77,15
C ₃	92,5	74	70	86,41

Tab. 5.4 : Capillarité des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)

b- Discussions des résultats des essais géotechniques

La masse volumique absolue et la porosité des roches saines sont différentes d'un échantillon à un autre (Tab. 5.2), ceci montre que les carrières ou les niveaux d'extraction des pierres ne sont pas les mêmes, on peut parler d'une variabilité de microfaciès au niveau de la même formation (calcarénite plio-quaternaire). En plus, la différence de porosité non négligeable entre les roches saines et celles altérées doit être prise en compte lors de la restauration afin d'éviter l'incompatibilité entre les deux matériaux.

Les pierres altérées présentent une résistance à la compression légèrement inférieure à celles des pierres saines (Tab. 5.3) ce qui valide en partie le choix de la calcarénite comme matériau de construction de grande longévité.

La capillarité est très importante pour les deux types de pierres, mais, avec une grande différence entre les roches saines et les roches altérées (Tab. 5.4),

ceci explique l'importance des remontées capillaires comme cause de dégradation et l'apparition des tâches d'humidité à la base des murailles.

Donc, on constate que les caractéristiques géotechniques des roches altérées de l'enceinte sont différentes de celles des roches saines des carrières. Ceci est lié essentiellement aux changements des conditions environnementales des roches saines (milieu rural) et des roches altérées (milieu urbain). Ces changements sont à l'origine de l'incompatibilité entre les deux types de roches lors des opérations de restauration, et par la suite l'accélération du phénomène d'altération.

4- Les essais de vieillissement

On a pratiqué une série d'essais d'altération artificielle (cristallisation des sels et attaque par les acides) appliqués sur des pierres de carrières, qui reproduisent les conditions ambiantes trouvées généralement dans la zone étudiée. Nous avons sélectionné deux types de pierre à bâtir en raison de leur représentativité des calcarénites utilisées dans les actuelles opérations de restauration dans la région de Rabat-Salé: les pierres de Bouknadel (A) et ceux de Mediouna (B). Ces essais nous ont permis de comparer entre les formes d'altération développées pour chaque type de pierre, d'évaluer le changement de la structure et de la composition minéralogique, et finalement d'approfondir les connaissances sur les processus de détérioration des pierres monumentales. Les effets de ces altérations artificielles sont quantifiés et analysés.

a- Etude des caractéristiques générales des lithotypes étudiés

Ces essais sont portés sur des échantillons prélevés des carrières de Bouknadel (nord-est de Salé) et de Mediouna (sud-ouest de Salé) (Fig.5.3-5.4) afin de simuler les conditions micro-environnementales et climatiques semblables à celles où se trouvent les monuments, en particulier la pollution atmosphérique et les embruns marins, et par conséquent, suggérer les techniques

les plus appropriées et les plus adaptées dans les opérations et les interventions de restauration et de conservation.

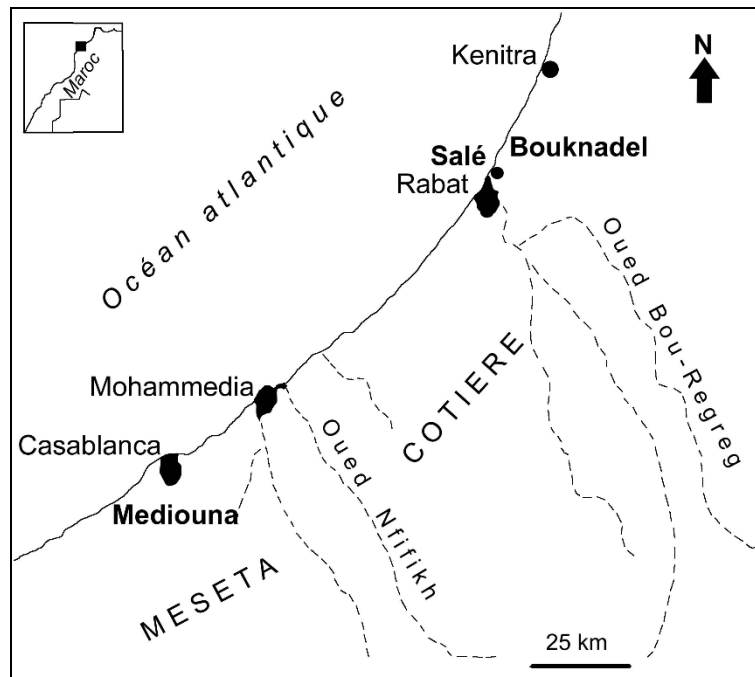


Fig.5.3. Location des carrières Bouknadel et Mediouna

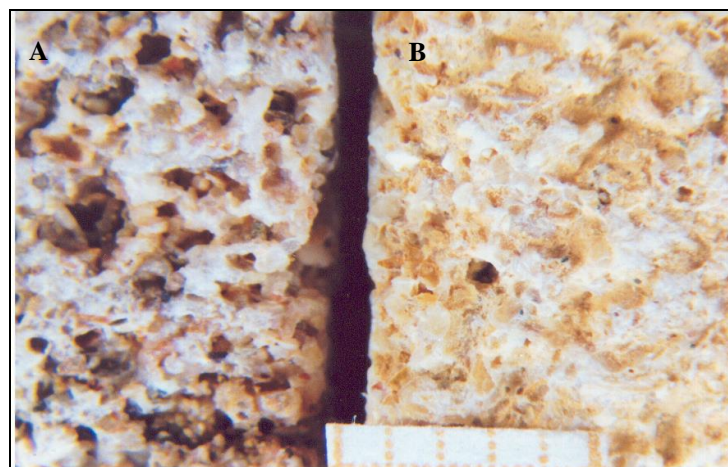


Fig. 5.4. Calcarénite du littoral atlantique : (A) pierre de Bouknadel, (B) pierre de Mediouna (obj: x6) (1carré = 1cm)

D'après l'étude des caractéristiques générales des deux types de pierres, résumées dans le tableau 5.5, on remarque une nette différence entre la roche de Bouknadel (A) et celle de Mediouna (B) de point de vue couleur, caractères pétrographiques (taille des grains, réseau poreux) ainsi que caractères géotechniques (la résistance à la compression).

Caractéristiques		A	B
Lithotype	Provenance	Bouknadel	Mediouna
	Description	Couleur grise, grains moyens, texture poreuse, riche en calcite et très fossilifères.	Couleur jaune à ocre, grains fins,
	Stratigraphie	Plio-Quaternaire	
Porosité		Type intergranulaire, les pores souvent profonds et reliés entre eux.	Type intragranulaire, les pores peu profonds.
Résistance		Bonne	Moyenne

Tab 5.5 Les caractéristiques des roches saines de Bouknadel et de Mediouna

b- Protocole expérimental

On a choisi deux types d'essai : la cristallisation saline et l'attaque par les acides, du fait que les sels et les acides sont connus comme étant des agents importants de détérioration dans les milieux pollués et les milieux côtiers (cas de la ville de Salé) (Evans, 1969). Ces essais sont pratiqués sur des échantillons de taille et de forme normalisées (cubes de 5 cm de côté).

b1- Essai de cristallisation des sels

L'essai consiste à immerger partiellement l'échantillon dans une solution saline (Sulfate de sodium à 10% de concentration ou Chlorure de sodium à 10% de concentration) pendant 2 heures, à le sécher au four à une température de 60°C pendant 2 heures et à le refroidir à la température ambiante pendant 19 heures. Après refroidissement, le cycle Immersion/Séchage est répété plusieurs fois. A la fin de cet essai, on procède à un lavage des échantillons afin d'éliminer les croûtes de sels formés à la surface.

Ce processus de cristallisation saline peut prendre place dans les fondations du bâti historique où les solutions salines du sol remontent dans les pierres poreuses par capillarité et cristallisent dans l'espace interstitiel de la pierre monumentale causant ainsi la désintégration du matériel. Les solutions salines proviennent aussi des apports atmosphériques en embruns marins.

b2- Essai de corrosion par les acides

On procède par une immersion partielle de l'échantillon dans la solution acide : Acide sulfurique (H_2SO_4) à 10% de concentration ou Acide chlorhydrique (HCl) à 10% de concentration, pendant 24h. On le lave à l'eau chaude à 50-60°C, et ensuite on le sèche. Le cycle est répété plusieurs fois. Ce processus reproduit l'action des pluies acides sur la pierre monumentale.

c- Résultats et Discussions

Les résultats de ces essais de vieillissement montrent des dégâts irréversibles sur les pierres traitées:

- Variation du poids initial (tab 5.6);
- Modifications morphologiques sur les surfaces des échantillons traités (tab 5.7) ;
- Variation de la composition minéralogique avec dépôt des substances exogènes (gypse, thenardite, anhydrite) détectés par DRX (tab 5.8) et observés par la loupe binoculaire et le MEB.

La variation du poids initial (tab 5.6) par perte du poids traduit la désagrégation de l'échantillon, alors que l'augmentation du poids par contre, traduit la cristallisation de nouvelles substances détectées par DRX. On a remarqué durant ces essais que les deux types de roches présentent les mêmes formes d'altération (tab 5.7), mais, avec une vitesse d'apparition différente : le lithotype de Mediouna s'altère plus rapidement que celui de Bouknadel. L'utilisation des deux types de roches de résistance différente dans les opérations de restauration actuelle laisse à réfléchir sur les répercussions de ce choix.

L'analyse par DRX (fig.5.5) montre que la roche saine (A) contient deux phases cristallisées : la calcite et le quartz; la roche saine (B) contient par contre trois phases cristallisées : la calcite, le quartz et la dolomite. La calcite est le minéral dominant dans les deux types de roches. La calcite et le quartz sont présents dans tous les échantillons de roches saines et altérées.

Echantillons	Poids initial (g)	Poids final (g)	Variation du poids (%)
A ₁	223,03	229,2	+2,69
A ₂	187,28	217,41	+13,86
A ₃	197,77	217,84	+9,21
A ₄	198,3	128,41	-35,24
B ₁	191,21	227	+15,77
B ₂	208,08	259,23	+19,73
B ₃	193,81	213,36	+9,42
B ₄	174,92	156,981	-10,3

Tab 5.6 Mesure des variations de poids (A, Bouknadel; B, Mediouna; 1, NaCl (10%); 2, Na₂SO₄ (10%); 3, H₂SO₄ (10%); 4: HCl (10%).

Lithotype	Immersion partielle dans NaCl (30cycles)	Immersion partielle dans Na ₂ SO ₄ (30 cycles)	Immersion partielle dans HCl (30cycles)	Immersion partielle dans H ₂ SO ₄ (30cycles)
Bouknadel (A)	-altéré -efflorescence -gain du poids	-altéré -gain du poids	-altéré -perte du poids -désagrégation	-altéré -gain du poids -cassures -changement de couleur
Mediouna (B)	-altéré -efflorescence -gain du poids	-altéré -gain du poids	-altéré -perte du poids -désagrégation	-altéré -gain du poids -cassures -changement de couleur

Tab. 5.7 Dégâts visibles sur les roches de carrières après les essais de vieillissement

Les roches altérées présentent des compositions minéralogiques différentes différentes selon l'agent dégradant (sels ou acides). Les roches altérées par les sels (A₂ et B₂) montrent une dominance de la calcite contrairement aux roches altérées par les acides où on remarque de faible valeur de calcite. On note, après l'attaque de la roche saine par l'acide sulfurique, la précipitation de gypse (15%-18%) et d'anhydrite (2%-15%), alors que pour les roches attaquées par les sels, on a la précipitation de thenardite (22%-23%). Lors de l'attaque de la roche par l'acide chlorhydrique, on observe clairement la désagrégation granulaire de la pierre et une perte importante de matière (Fig.5.6). Il provoque une perte du matériel pierreux et la pierre devient friable en perdant la cohésion entre les grains par la dissolution de la matrice carbonatée.

Ces substances se sont cristallisées dans le réseau poreux des roches calcarénitiques, elles exercent une pression notable qui produit généralement une désagrégation granulaire ou parfois une fracturation du bloc (Azzoni et al, 1992); ces formes d'altération sont observées sur les lithotypes traités (tab5.7).

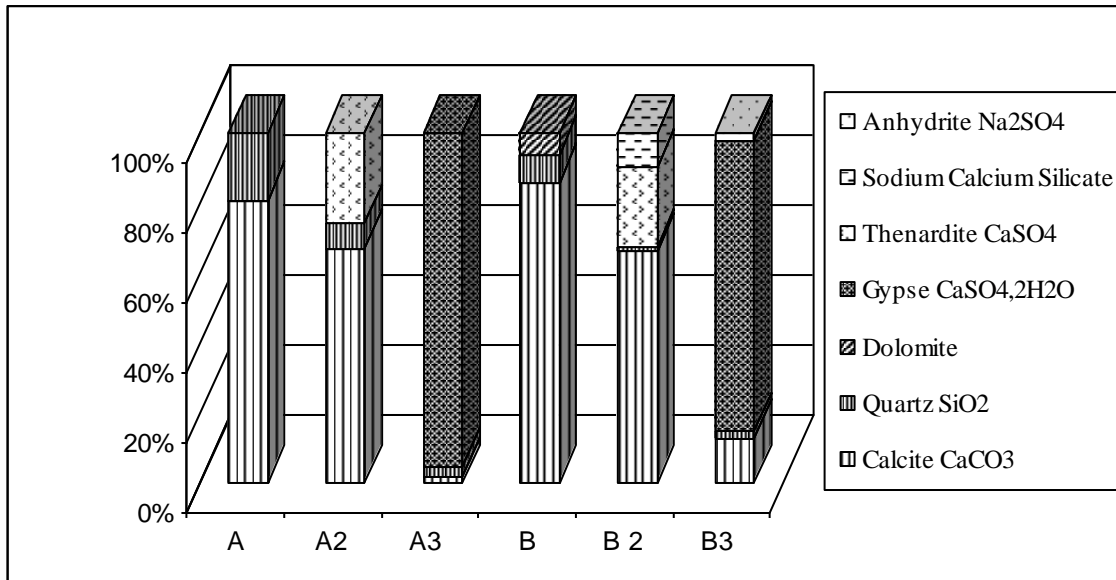


Fig. 5.5. Analyse par DRX des échantillons de roches saines et altérées par les essais de vieillissement

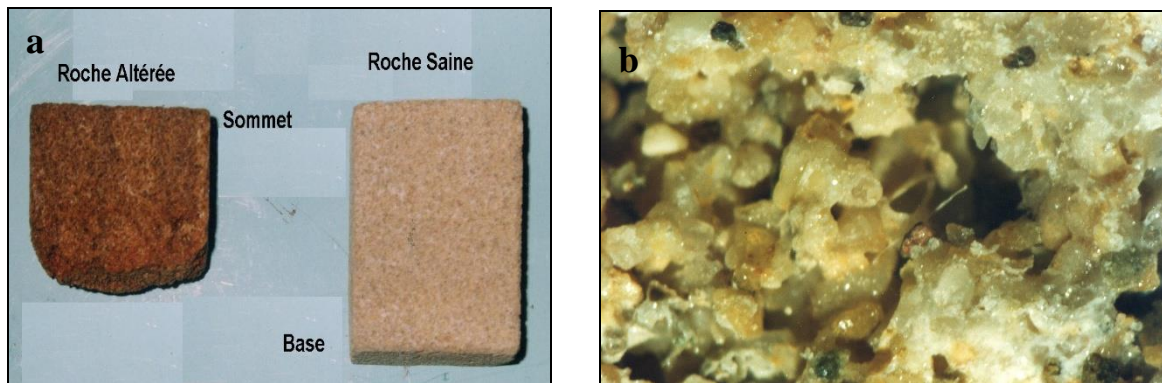


Fig.5.6 Photos montrant la roche de Mediouna avant et après attaque par l'acide chlorhydrique à l'œil nu (a) et à la loupe binoculaire (b).

Ces processus de fracturation et de désagrégation peuvent prendre place dans les fondations des bâtiments où les solutions salines du sol remontent dans les pierres poreuses par capillarité, et cristallisent dans l'espace interstitiel causant la désintégration du matériel après lessivage par la pluie (Azzoni et al, 1992).

L'observation des pierres saines par la loupe binoculaire montre des cristaux de calcite avec des pores de dissolution (Fig.5.7-1 A ; B).

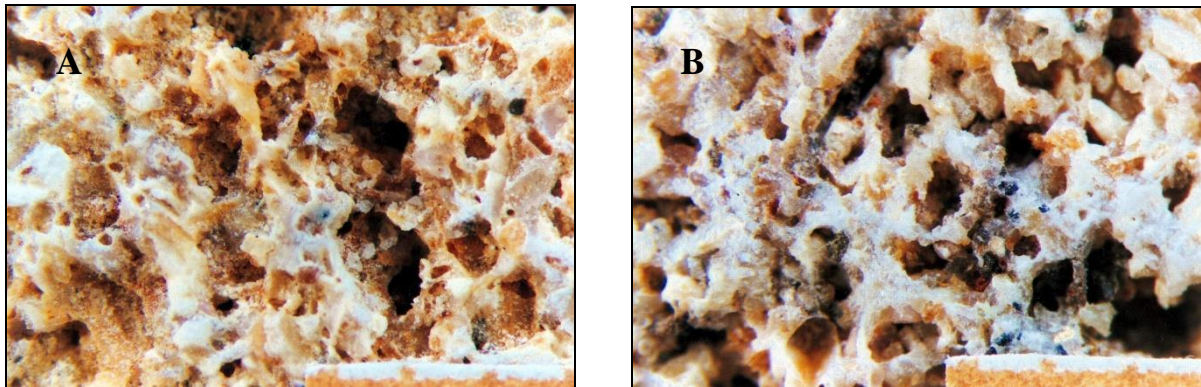


Fig.5.7-1 Observation des pierres saines A et B par la loupe binoculaire.

Dans le cas d'altération par l'acide sulfurique (H_2SO_4), on observe le dépôt des cristaux de gypse et de l'anhydrite dans les pores. La base des échantillons traités montre un recouvrement total de la base par les cristaux de gypse (Fig.5.7-2a). La succession des cycles de dissolution-séchage a provoqué la fracturation de la pierre traitée (A) (Fig.5.7-2b). L'observation par la loupe binoculaire montre que ces cristaux apparaissent sous formes de minces aiguilles (Fig.5.7-2 A₃ et B₃).

Ceci se confirme par le microscope électronique à balayage (MEB) qui montre une plage de calcite avec de nombreux trous de dissolution, aux alentours desquels la calcite est enrichie en cristaux de gypse (Fig.5.8).

Cette précipitation s'effectue toujours par une augmentation importante de volume, ce qui entraîne un éclatement progressif de la roche, une désorganisation de sa structure et une perte de sa cohésion. Ce phénomène s'observe lors des hivers successifs où la roche monumentale devient friable et gélive rendant d'autant plus efficace le processus de désagrégation physique (Urmenta et al, 1992).

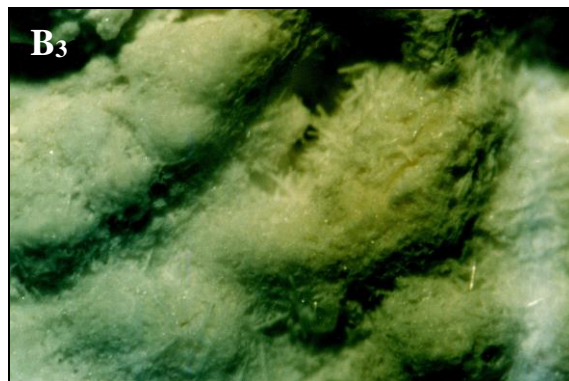
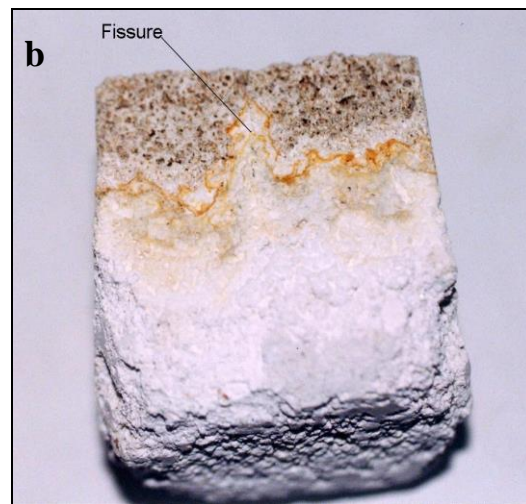
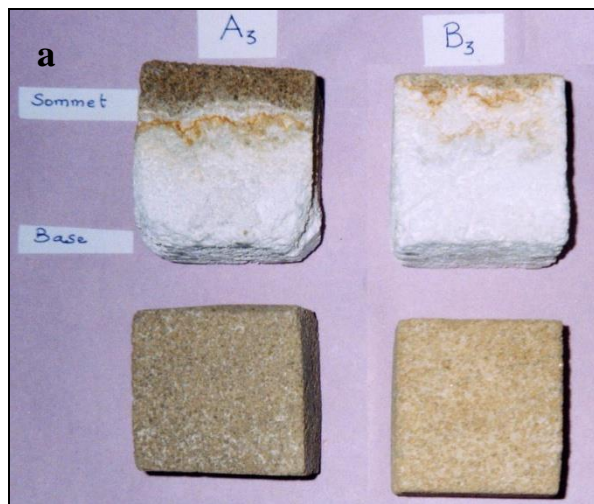


Fig.5.7.2- Observation des roches traitées (A₃ et B₃) par attaque l'acide sulfurique à l'œil nu (a) et (b), et par la loupe binoculaire (A₃ et B₃).

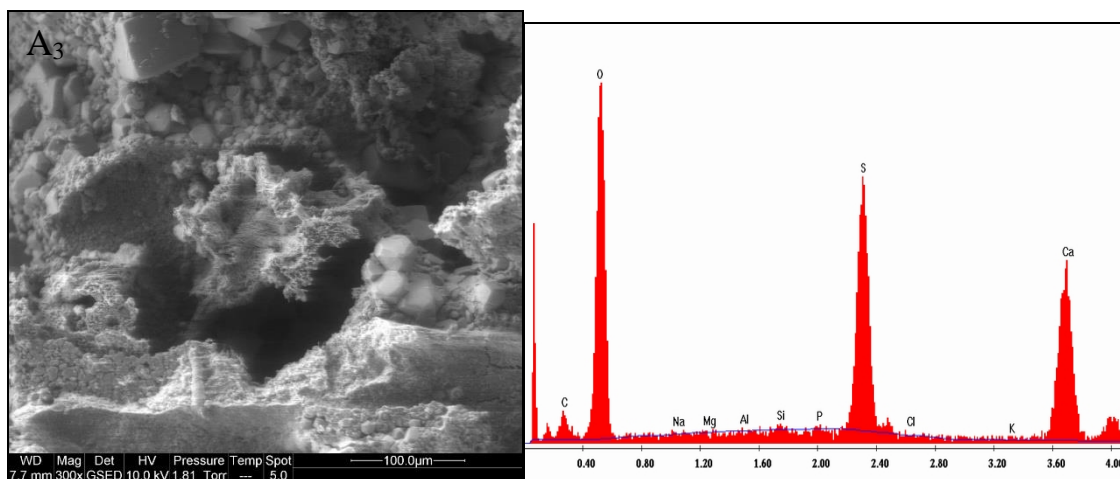


Fig.5.8a : Observation par MEB-EDX des cristaux de gypse formés dans la roche traitée Bouknadel (A₃).

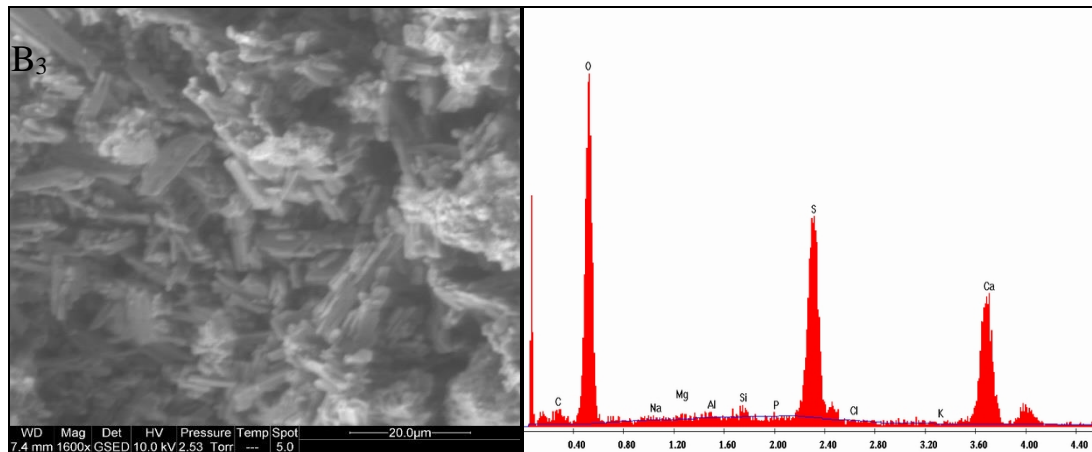


Fig.5.8b : Observation par MEB-EDX des cristaux de gypse formés dans la roche traitée de Mediouna (B₃).

L'attaque chimique par les sels se manifeste par la formation de cristaux de thenardite à la surface des échantillons (Fig.5.9 A₂ et B₂). La formation de ce composé, plus soluble que la calcite, produit une perte du matériel qui se dissout par lessivage (effet de pluie) en provoquant une augmentation des pores (Alcalde et al, 1990).

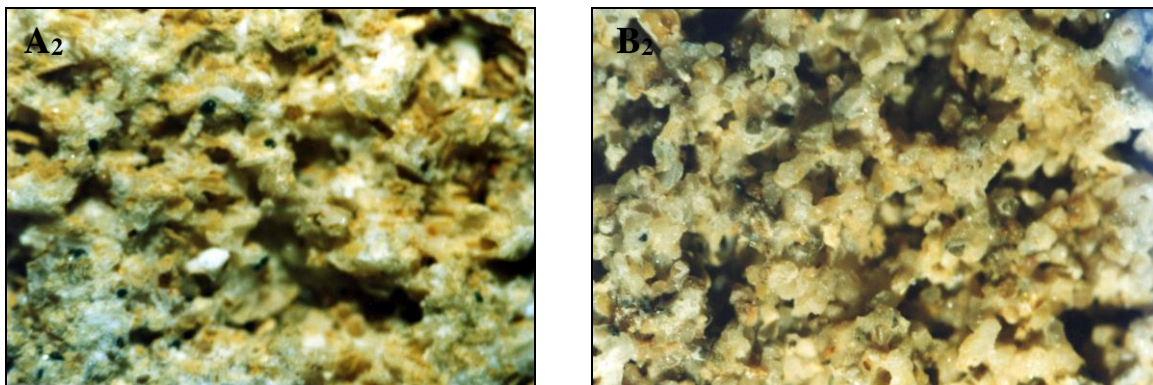


Fig.5.9 Observation par la loupe binoculaire de l'aspect de la texture des roches traitées par des sels (A₂ et B₂).

En fait, la dégradation des roches par les sels résulte de la répétition des cycles dissolution-cristallisation, entraînant le dessertissage des grains constitutifs de la roche. Cette action, qui modifie la porosité du matériau, est d'autant plus destructrice qu'elle est fréquente. Elle dépend des propriétés physiques de la roche qui déterminent la position des évaporations en surface ou en profondeur, de la nature des différents sels ainsi que de l'exposition ; c'est de ces conditions que dépendent les différentes formes que peuvent prendre

certaines dégradations comme les désagréations et les desquamations (Arnold et Zehner, 1989; Arnold, 1997; Hammecker, 1993; Jeannette, 1997)

IV- Conclusion

La caractérisation géotechnique des pierres saines et des pierres monumentales altérées nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions :

- la différence non négligeable de porosité entre les roches saines et celles altérées, doit être prise en compte lors de la restauration afin d'éviter l'incompatibilité entre les deux matériaux.

- la différence des caractéristiques géotechniques des roches saines d'un échantillon à un autre montre que les carrières ou les niveaux d'extraction des pierres ne sont pas les mêmes, on peut parler d'une variabilité de microfaciès au niveau de la même formation (calcarénite plio-quadernaire).

- la faible différence de la résistance entre les pierres saines et celles altérées valide en partie le choix de la calcarénite comme matériau de construction de grande longévité.

- la capillarité est très importante pour les deux types de pierres, mais, avec une grande différence entre les roches saines et les roches altérées, ceci explique l'importance des remontées capillaires comme cause de dégradation et l'apparition des tâches d'humidité à la base des murailles.

Donc, on constate que les caractéristiques géotechniques des roches altérées de l'enceinte sont différentes de celles des roches saines des carrières. Ceci est lié essentiellement aux changements des conditions environnementales des roches saines (milieu rural) et des roches altérées (milieu urbain). Ces changements sont à l'origine de l'incompatibilité entre les deux types de roches lors des opérations de restauration, et par la suite l'accélération du phénomène d'altération. Ainsi, l'apport d'un milieu environnemental pollué dans l'altération des roches monumentales révèle une réponse négative. Elle se manifeste sous différentes formes d'altération (désagréation, alvéoles, décoloration, ...)

observées constamment sur les remparts de l'enceinte de Salé malgré les incessants travaux de restauration.

On peut conclure que les processus d'altération causent des dégâts notables des propriétés mécaniques des calcarénites. En plus, la différence des caractères géotechniques au sein des roches saines dans une même formation impose un choix judicieux des niveaux exploités au niveau du réseau poreux, de la taille des grains et de résistance avant toute opération de restauration. Concernant la reproduction expérimentale des pathologies observées sur les façades de l'enceinte par l'action des polluants (les sels et les acides), on s'aperçoit que les acides et les sels sont effectivement des paramètres responsables des principaux types l'altération (efflorescence, fissuration, décoloration, désagrégation) qui sont irréversibles. Ces modifications se manifestent par une perte du matériel pierreux et la pierre devient friable en perdant la cohésion entre les grains par la dissolution de la matrice carbonatée (cas de l'attaque par l'acide chlorhydrique) et la précipitation des substances cristallisées (cristaux de gypse, de l'anhydrite et de thenardite) dans le réseau poreux des roches calcarénitiques (cas de l'attaque par l'acide sulfurique et les sels).

La précipitation des cristaux de gypse et de l'anhydrite s'effectue toujours par une augmentation importante de volume, elle exerce une pression notable et crée une contrainte mécanique en augmentant le volume de la pierre (M. Saba et 2018), ce qui entraîne un éclatement progressif de la roche, une désorganisation de sa structure et une perte de sa cohésion (Azzoni et al, 1992). La formation de thenardite, plus soluble que la calcite, produit une perte du matériel qui se dissout par lessivage (effet de pluie) en provoquant ainsi une augmentation des pores (Alcalde et al, 1990). Donc, on peut dire que ces différentes conclusions confirment le rôle des conditions environnementales dans le processus de dégradation, et apporte un plus aux restaurateurs en indiquant les principales causes responsables d'altération.

A large, horizontally-oriented oval with a marbled, stone-like texture. The oval has a dark, double-lined border and a subtle drop shadow effect. It is centered on the page.

Quatrième partie :
Analyses chimiques et facteurs d'enrichissement

Chp.6 : Analyses chimiques des produits d'altération, des pierres et des enduits

I- Introduction

Les observations sur le terrain des remparts de l'enceinte de Salé nous ont permis le repérage des matériaux altérés à échantillonner (croûtes, pierres, alvéoles, mortiers et enduits). Ensuite, des analyses chimiques ont été entamées sur ces prélèvements afin de définir la minéralogie, la composition des matériaux de construction (pierres, mortiers et enduits) et des produits d'altération (croûtes, alvéoles). Ceci nous a permis la détermination des causes de dégradation, d'évaluer le degré d'altération ; ainsi que les différents modes et mécanismes d'altération par les aérosols atmosphériques et marins.

II -Analyse chimique des matériaux sains et altérés

1- Echantillonnage et Méthodes

Des échantillons de croûtes, d'alvéoles, de pierres altérées, d'enduits et de mortiers ont été prélevés afin d'analyser l'altération de la pierre monumentale de Salé (tab.6.1).

Les échantillons de la croûte noire et d'alvéole ont été prélevés par grattage à une hauteur de 1,5 à 2m. Les pierres altérées ont été prises lors des opérations de restauration. Les enduits sont prélevés des zones altérées à l'aide d'une pince.

Les techniques d'analyses employées sont : la microscopie électronique à balayage (MEB), la fluorescence aux rayons X (FRX), la chromatographie ionique (CI), la spectrométrie d'absorption atomique (SAA), et la diffraction aux rayons X (DRX).

Pour déterminer la composition en éléments majeurs par la fluorescence aux rayons X (FRX), l'échantillon, après broyage, sera tamponné par 4g d'acide borique (H_3BO_3) ; alors que l'analyse de la microstructure par MEB et de la

composition minéralogique par DRX ne nécessitent aucune préparation des échantillons.

Localisation	Code	Type d'échantillon	Méthodes d'analyse
Bab Mrisa	CBM	Croûte	MEB-FRX-CI-SAA-DRX
	BM	Pierre altérée	MEB-FRX-CI-DRX
Bab Fès	CBF	Croûte	MEB-FRX-CI-SAA-DRX
	FBF	Alvéole	FRX-CI-DRX
	BF	Pierre altérée	MEB-DRX
Muraille Bab Fès	MBF ₁	Pierre altérée	MEB
	MBF ₂	Pierre altérée	MEB
Bab Chaâfa	CBC _H	Croûte	CI-SAA-DRX
	JBC _H	Joint	FRX-CI
	EBC _H	Enduit	MEB-FRX-CI-DRX
Borj Sidi Ben Achir	CBS _B	Croûte	FRX-CI
	TBS _A	Pierre altérée	FRX-CI
Bab Sebta	CBS	Croûte	FRX-CI-SAA-DRX
	EBS	Enduit	FRX-CI-DRX
Bab Mâalka	CBM _K	Croûte	CI-SAA
Bab Jdid	CBJ	Croûte	CI-SAA
Carrière Bouknadel	BKD	Pierre saine	MEB-FRX-CI-DRX
Enduit de restauration	END	Enduit	FRX-DRX

Tab 6.1 : Caractérisation des échantillons étudiés selon le site d'échantillonnage et les méthodes d'analyses utilisées (MEB: Microscope Electronique à Balayage, FRX: Fluorescence aux Rayons X, CI : Chromatographie Ionique, SAA: Spectrométrie d'Absorption Atomique, DRX : Diffraction aux Rayons X)

La chromatographie ionique en phase liquide est utilisée pour l'analyse des cations et des anions des sels solubles (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , Na^+ et K^+) et la spectrométrie d'absorption atomique pour identifier et quantifier les métaux

lourds (Pb, Ni, Cd, Cu, Cr et Zn). Pour extraire les anions et les cations des sels solubles et les métaux lourds des échantillons étudiés, on a procédé selon le protocole suivant : Après broyage de l'échantillon au mortier en agate, on en prélève 200mg qu'on met dans un récipient rempli de 100ml d'eau désionisée et qu'on place dans un agitateur pendant 2h. Le filtrat est ensuite analysé après dilution éventuelle (Blanc et al, 1981).

Un brève rappel des ions des sels solubles et des métaux lourds analysés nous paraît nécessaire avant de présenter les résultats de ces analyses.

2- Définition des sels solubles et des métaux lourds

a- Les nitrates

Les nitrates (NO_3^-) sont des ions naturels présents partout dans l'environnement. Ils sont le produit de l'oxydation de l'azote (qui représente 78% des constituants de l'atmosphère). Les principaux émetteurs sont les grandes installations de combustion et surtout les véhicules automobiles. Volcans, orages, feux de forêts contribuent aussi aux émissions. Les nitrates sont la forme oxydée de l'azote qui est la plus stable, mais, ils peuvent être réduits en nitrite, modérément réactif, par action microbienne. Le monoxyde d'azote NO se transforme en présence d'oxygène en dioxyde d'azote NO_2 (de 0,5 à 10 %). Cette réaction se poursuit lentement dans l'atmosphère et explique dans le cas des villes à forte circulation la couleur brunâtre des couches d'air pollué situées à quelques centaines de mètres d'altitude (action conjointe des poussières). Les oxydes d'azote interviennent également dans la formation des oxydants photochimiques et par effet indirect dans l'accroissement de l'effet de serre. En raison de la stabilité relative de l'ion nitrate, la plupart des substances azotées de l'environnement ont tendance à se transformer en nitrates.

b- Les sulfates

Le soufre est un élément non métallique. Ces sources les plus importantes pour les utilisations commerciales sont le soufre élémentaire, le soufre d'hydrogène (H_2S qui se trouve dans le gaz naturel et le pétrole brut) et les

sulfures métalliques comme la pyrite. En se combinant à l'oxygène, le soufre hexavalent donne l'ion sulfate (SO_4^{2-}).

L'interconversion réversible des sulfates dans le milieu naturel est appelée « cycle du soufre ». Le soufre, principalement sous la forme d'acide sulfurique, est l'un des produits chimiques les plus utilisés dans les sociétés industrialisées. Des produits à base de sulfates ou d'acide sulfurique servent aussi dans la fabrication de nombreux produits chimiques, teintures, verres, papiers, savons, textiles, fongicides, insecticides, composés astringents et émétiques. Il sert aussi dans les industries des mines, de la papeterie, de la métallurgie et du placage, dans les épurations des eaux d'égout et dans la transformation du cuir.

c- Les chlorures

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils représentent environ 0.05% de la lithosphère. Ce sont les océans qui contiennent les plus grandes quantités de chlorures dans l'environnement.

Le chlorure de sodium est largement employé dans la production de produits chimiques industriels comme la soude caustique (hydroxyde de sodium), le chlore, carbonate de sodium, le chlorite de sodium, le bicarbonate de sodium et l'hypochlorite de sodium.

La présence des chlorures dans les sources d'eau peut être attribuée à la dissolution des dépôts de sel, aux embruns marins, aux effluents des usines à produits chimiques, aux eaux des égouts, à l'écoulement des eaux d'irrigation, aux eaux de lixiviation des déchets, et aux émanations volcaniques.

d- Le Sodium

Le sodium est un élément constant de l'eau, il provient généralement de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation, de l'activité humaine qui emploie beaucoup de sodium dans ses diverses industries, de la montée des eaux salées dans la nappe phréatique et l'hypochlorite de sodium utilisé dans le traitement de l'eau potable.

e- Le Potassium

Le potassium est l'un des principaux métaux alcalins des eaux. Les minéraux contenant du potassium, pour la plupart, des feldspaths et des micas, sont abondants mais peu solubles. C'est un élément normal des eaux, sa présence est à peu près constante dans les eaux naturelles.

2- Les métaux lourds

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (cas de l'arsenic par exemple) caractérisés par une masse volumique supérieure à 5g/cm^3 . Ils sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces.

Les métaux lourds sont des contaminants environnementaux stables et persistants puisqu'ils ne peuvent pas être dégradés ou détruits. Par conséquent, ils tendent à s'accumuler dans les sols, l'eau (eau de mer ou eau douce), et les sédiments. L'exploitation des gisements, l'érosion, les prélèvements d'eau ou les éruptions volcaniques, vont répandre des traces de ces éléments dans l'environnement. Outre ces sources naturelles, l'activité humaine, même si elle ne crée pas de métaux lourds, a rigoureusement changé l'équilibre et les cycles biogéochimiques de quelques métaux lourds. Elle participe aussi à leur diffusion dans l'environnement.

III– Résultats et interprétation des analyses chimiques

1- Observations par MEB-EDX

L'observation par MEB couplé au système de microanalyse–X (détecteur EDX-EDAX) de la roche de Bouknadel (BKD) montre qu'elle est très riche en CaCO_3 et présente des structures variables des pores. Les grains de calcite et de quartz sont cimentés par la microsparite (Fig.6.1).

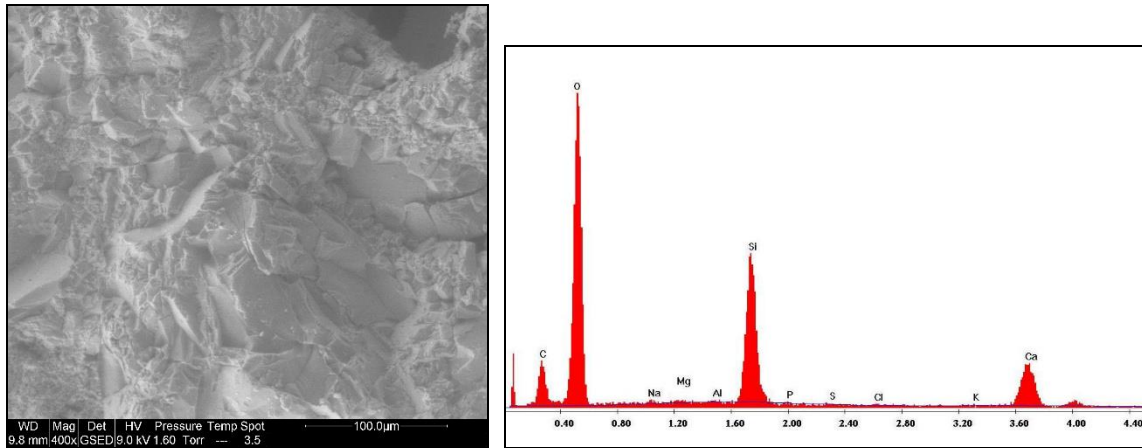


Fig.6.1 Photo par MEB-EDX de la roche de Bouknadel

L'observation par MEB des croûtes noires montre des traces de dissolution de la calcite et des grains du quartz et une surface craquelée et érodée. La figure 6.2 montre les grains de quartz qui baignent dans un ciment dissout et disséminé par des particules de gypse. Les éléments calcitiques ou quartziques montrent une dissolution et des craquelures (Fig.6.3).

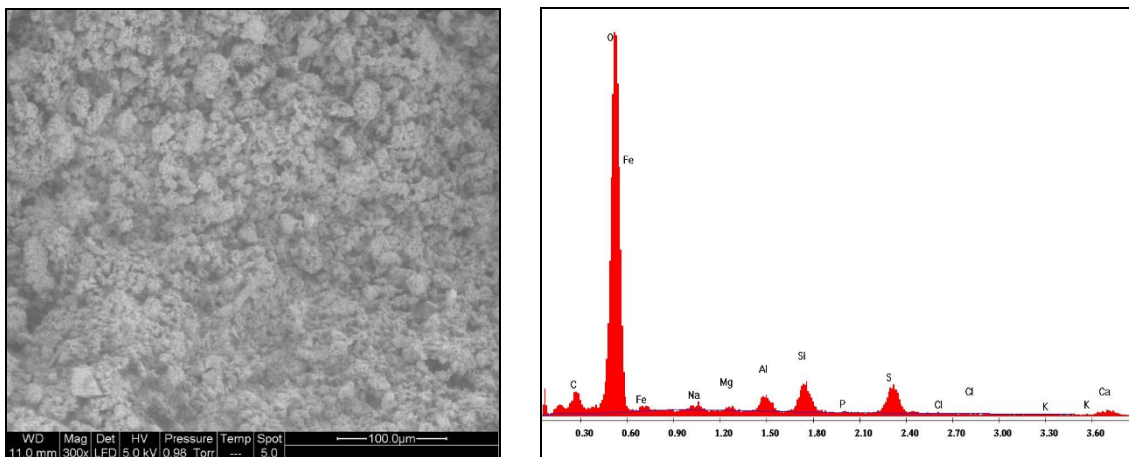


Fig.6.2 : photo par MEB-EDX de l'échantillon CBM

La dissolution du ciment carbonaté (Fig.6.4 a) et la recristallisation (Fig.6.4 b) successive de la calcite sont aussi observées, ce qui montre que l'érosion de la calcarénite est en rapport, principalement, avec les processus de cristallisation et de dissolution successive de la calcite et la précipitation de masses de cristaux du gypse qui vont piéger des particules différentes contenant les métaux lourds détectés par SAA.

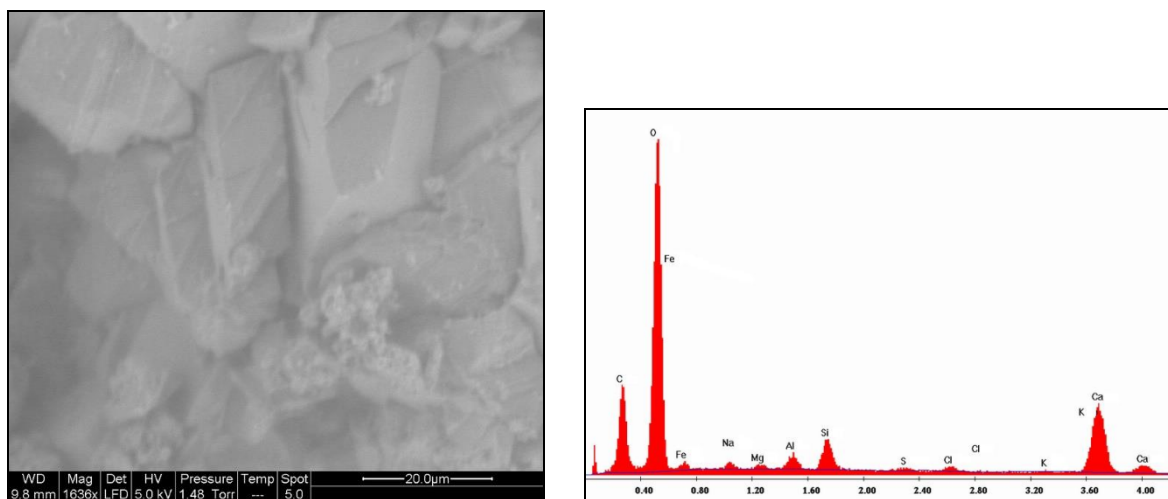
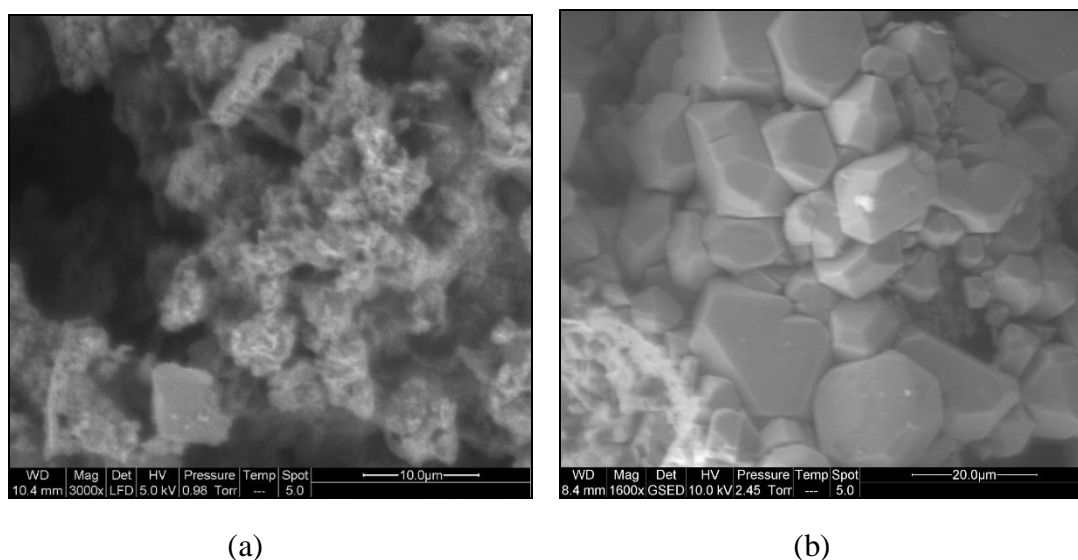


Fig.6.3 Photo par MEB-EDX de la pierre de BM



(a)

(b)

Fig.6.4 : photos par MEB des pierres altérées : MBF1 montre une dissolution (a) et MBF2 une recristallisation des cristaux de calcite

L'échantillon BF (Fig.6.5) montre une texture granulaire, les pores et les cavités sont remplis par les cristaux de gypse, ce qui cause un désordre structurel par la désintégration des grains.

L'observation par MEB d'un échantillon de l'enduit EBCH montre la présence des cristaux de gypse sous forme des aiguilles et des amas (Fig.6.6).

La microanalyse par le détecteur EDX-EDAX montre la présence de SO_3 comme éléments exogènes (Tab. 6.2).

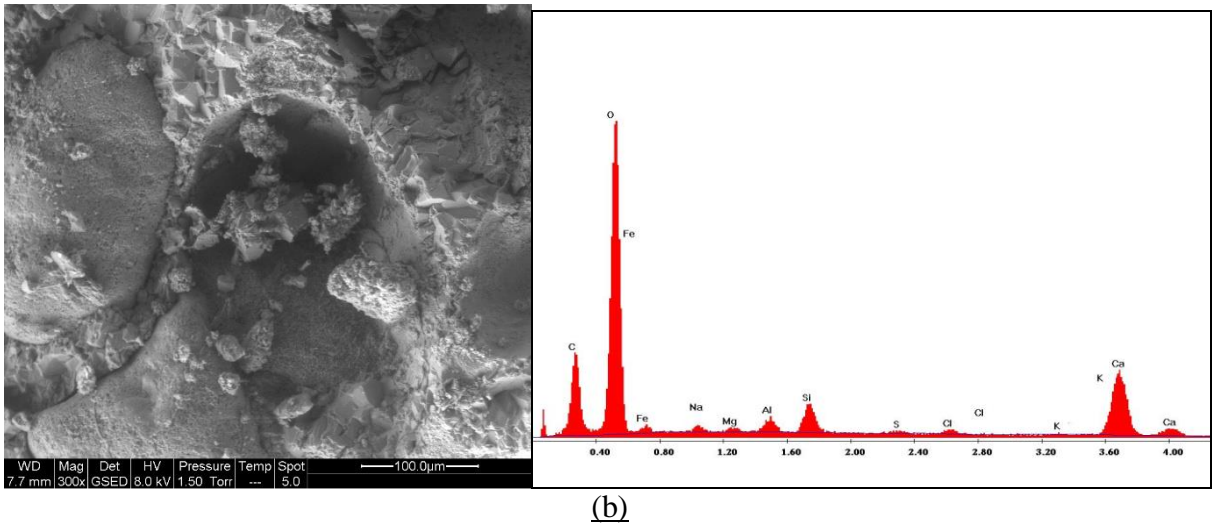
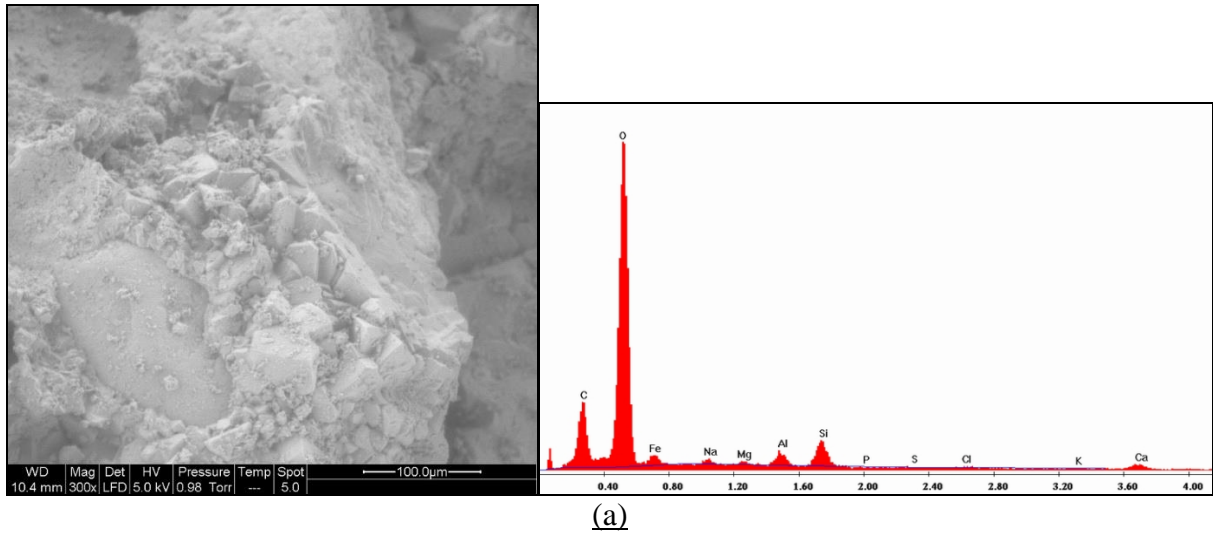


Fig.6.5 : (a) et (b) Photos par MEB-EDX de l'échantillon BF



Fig. 6.6 : Photo par MEB d'échantillon d'enduit (EBCh).

Oxydes %	BKD	CBF	BF	BM	CBM
Fe ₂ O ₃	0.05	3.73	11.22	1.18	n.d
Na ₂ O	0.62	1.02	1.25	0.23	0.08
MgO	0.63	0.95	1.16	0.26	0.00
Al ₂ O ₃	0.59	5.45	6.46	1.03	0.00
SiO ₂	57.38	15.42	18.87	3.26	0.52
P ₂ O ₅	0.00	0.85	0.00	n.d	0.24
SO ₃	0.00	31.64	0.00	0.71	51.12
Cl ₂ O	0.66	0.75	2.27	0.92	0.17
K ₂ O	0.26	0.73	1.50	0.35	0.64
CaO	39.87	39.46	57.27	92.07	47.23

Tab 6.2 : composition chimique en éléments majeurs par EDX (n.d: non détecté)

2 Analyses par FRX

Les analyses des échantillons de croûtes, d'alvéole, d'enduits et de roches par FRX (tab 6.3) montrent que tous les échantillons analysés ont une quantité élevée en calcium Ca sauf le mortier JBCH. Le soufre S est trouvé dans les croûtes noires, alvéole, pierres altérées et mortiers anciens avec des pourcentages différents. Le chlore se trouve dans toutes les croûtes étudiées mais pas dans l'alvéole FBF, Le plomb Pb est présent dans la croûte CBSB seulement, et dans les mortiers EBS et EBCH. Le mortier EBCH contient une quantité élevée en chlore Cl.

On remarque que les croûtes et les pierres altérées ont la même composition chimique en éléments majeurs que la roche Bouknadel (BKD) avec des différences de pourcentage et la précipitation de nouveaux composés, il s'agit de soufre et de chlore.

3- Analyse par CI

L'analyse quantitative des anions et des cations des sels solubles (nitrates, sulfates, chlorures, sodium, potassium) présents dans les croûtes noires, les pierres monumentales et les mortiers par chromatographie ionique (tab.6.4) montre que la roche de Bouknadel (BKD) contient de faibles quantités des sulfates, des nitrates et des chlorures. Par contre, on remarque que les sulfates, les nitrates, les chlorures, le sodium et le potassium existent partout sur les

croûtes des pierres appareillées des portes de l'enceinte, des pierres et des mortiers de l'enceinte avec des concentrations variables. Ces ions des sels solubles sont présents un peu partout à l'extérieur de l'enceinte sur les pierres des remparts.

Composé (%)	CBM	CBF	CBSB	FBF	CBS	EBS	EBCH	JBCH	BKD	BM	TBSA	End
Ca	13,90	14,43	10,80	30,66	13,62	12,24	17,26	5,67	17,71	18,52	13,40	5,50
Si	3,13	4,12	4,37	2,05	2,44	9,27	1,92	6,30	3,46	1,86	1,70	6,85
Fe	1,03	1,23	1,42	0,75	0,69	2,01	0,76	0,97	0,95	0,82	0,69	1,00
Al	1,13	1,28	1,37	0,57	0,76	4,27	0,64	1,13	1,07	0,67	0,56	1,24
Mg	0,48	0,46	0,58	0,43	0,30	0,99	0,53	0,22	0,26	0,50	0,24	0,25
Na	0,97	1,68	0,54	0,13	1,01	0,16	4,50	0,34	0,12	1,30	0,10	0,34
Cl	0,54	0,72	0,36	n.d	0,52	n.d	3,73	n.d	n.d	0,54	n.d	0,11
K	0,12	0,38	0,18	n.d	0,23	0,40	0,23	0,29	0,10	0,35	0,06	0,30
Sr	0,05	0,04	0,02	0,08	0,04	0,02	0,04	0,01	0,05	0,07	0,06	0,01
P	0,06	0,10	0,07	0,09	0,05	0,06	0,04	0,03	0,11	0,23	0,05	0,04
S	0,15	1,07	0,05	0,04	0,63	0,14	0,25	0,16	0,04	0,79	0,04	1,16
Pb	n.d	n.d	0,03	n.d	n.d	0,30	0,25	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ti	0,07	0,18	0,12	n.d	0,09	0,21	n.d	0,12	0,06	n.d	<<	0,15
Zr	n.d	n.d	10,80	n.d	n.d	0,01	n.d	0,01	n.d	n.d	n.d	<<
Mn	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	0,02

Tab 6.3. Concentrations moyenne des échantillons des pierres altérées analysée par FRX ; (n.d: non détecté)

La concentration en ions SO_4^{2-} est importante et atteint des valeurs élevées dans tous les échantillons des croûtes noires essentiellement dans l'échantillon CBF avec des concentrations moins importantes dans les pierres et les mortiers.

Les concentrations en ions Na^+ et Cl^- sont plus élevées dans l'échantillon CBSA. La concentration en ion K^+ est élevée dans l'échantillon CBF.

L'analyse des échantillons CBSB et TSBA du Borj Sidi Ben Achir, situé en face de la mer, montre une importante déposition en ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} . Les ions Na^+ et Cl^- proviennent essentiellement des aérosols marins, pendant que l'ion SO_4^{2-} doit être en rapport avec l'action anthropique.

	SO₄²⁻ (ppm)	NO₃⁻ (ppm)	Cl⁻ (ppm)	Na⁺(ppm)	K⁺ (ppm)
CBM	1797,3	42,82	161,8	6,6	0,24
CBSB	1120,87	37,34	532,12	102	2,54
CBMK	1864,31	150,28	98,08	12,3	1,79
CBJ	1756,39	134,19	331,29	18	0,36
CBCH	1631,43	231,93	491,67	1,4	0,05
CBF	2040,5	101,56	216,9	96,53	18,98
CBS	522,88	123,73	449,04	7,31	3,08
TSBA	376,74	37,18	174,15	13,02	5,27
BM	52,22	30,88	11,47	-	-
JBCH	30,84	13,26	8,32	-	-
FBF	108,33	35,38	14,46	-	-
EBS	623,93	112,28	452,6	-	-
EBCH	309,6	114,61	414,28	-	-
BKD	11,87	2,10	3,34	-	-

Tab. 6.4 Résultats de l'analyse des sels solubles des croûtes noires des portes de l'enceinte par chromatographie ionique (-: non analysé)

L'origine de ces différents anions est variable: embruns marins, pollution de l'air, bâtiment ou matière de la restauration (Vallet, 2006). La forte teneur en sulfate au niveau de la surface des pierres appareillées des portes (croûtes noires) peut être expliquée par le fait que les portes de l'enceinte permettent l'accès à l'intérieur de la médina et sont situées à proximité des axes routiers reliant Rabat (capitale du Maroc) aux différentes villes du Nord du royaume. Les sulfates sont dus principalement à la pollution atmosphérique, ils résultent des réactions d'oxydation du polluant majeur de l'environnement SO₂ (Ericsson et al, 1988 ; Camuffo et al, 1982). Ce dernier se produit par la combustion de soufre contenu dans les combustibles fossiles (charbon, fuel, diesel) ainsi que les processus industriels (chimie, métallurgie).

La présence des anions SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^- sont généralement représentatifs de la pollution saline des façades des monuments historiques (Ericsson et al, 1988). La présence des nitrates et des chlorures est liée respectivement au trafic routier et aux embruns marins. D'autres sources peuvent également être en cause de cette présence : les remontées capillaires d'eaux chargées en sels, les mortiers et les enduits de restauration. D'autres sources de chlorures et de nitrates sont à chercher : la nappe phréatique et l'eau de ruissellement qui sont chargées aussi de nitrates sachant que la nappe phréatique de Salé est située entre 10 à 30m et l'état de son assainissement est déplorable, ce qui permet de parler de plusieurs sources probables.

Les chlorures sont majoritairement d'origine marine (Chebas et al, 2000). Ils proviennent de l'eau de mer pulvérisée portée par les vents. Ces sels se cristallisent lors du séchage en surface ou en profondeur de la roche selon leur degré de solubilité d'où la formation des tâches blanchâtres, efflorescences, subflorescences. Ces sels peuvent se dilater ou se contracter sous l'effet de variation de température d'où l'augmentation du volume des cristaux dans les pores. Ceci engendre une pression qui peut provoquer, par son action répétée, la détérioration de la pierre. On assiste à la dislocation des couches superficielles, la désintégration granulaire, l'écaillage, la fissuration et même le détachement de la pierre entière. L'intensité des détériorations est directement liée à la fréquence des cycles humification/séchage, à la concentration des sels, à leur hygroscopie et leur aptitude à la cristallisation.

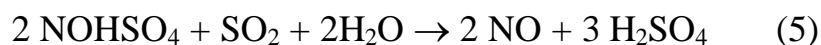
Les oxydes d'azote sont produits lors de tout processus de combustion à haute température. Ils ont pour source également les remontées capillaires d'eaux chargées en sels, les mortiers et les enduits utilisés dans les opérations de restauration.

Les nitrates sont partiellement lessivés par la pluie et migrent en partie sous forme de solution dans la pierre où ils participent au processus de décomposition.

Le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x) réagissent avec l'eau de pluie, de condensation ou de capillarité, et produisent respectivement l'acide sulfurique H₂SO₄ (1) et l'acide nitrique HNO₃ (2) et (3). Ces composés, qui sont des acides puissants, ont un effet destructif sur les minéraux composant les roches et entrent facilement en réaction avec les carbonates en les décomposant ce qui causent des dommages graves au niveau de la pierre.



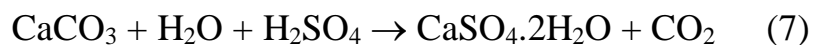
Les oxydes d'azote peuvent également augmenter le taux de dégradation des pierres calcaires par le SO₂ en favorisant la formation d'acide sulfurique par les réactions (4) (5):



L'acide nitrique agit sur la pierre calcarénitique en transformant les carbonates de calcium en nitrate de calcium plus soluble selon la réaction (6) :



Le dépôt d'acide sulfurique à la surface de la pierre contribue à son enrichissement et provoque ainsi sa dissolution. Il permet la formation du gypse par le processus de sulfatation ; c'est à dire la transformation du carbonate de calcium (CaCO₃) en sulfate de calcium hydraté ou gypse (CaSO₄.2H₂O) selon la réaction la plus mentionnée (Del Monte et al, 1995) (7):



Le processus de sulfatation, résultant de l'enrichissement atmosphérique en dioxyde de soufre, provoque d'une part une dissolution des grains de calcite et d'autre part une tension mécanique importante par la cristallisation de carbonates de calcium en sulfates de calcium.

Cette cristallisation de sulfates de calcium peut provoquer, à cause de son volume molaire qui est deux fois plus grand (Chauffriat, 1999) et sa solubilité 150 fois plus élevée que ceux de carbonate de calcium (Fally et al, 1999). La formation des encroûtements étanches à la surface, ce qui favorise la condensation de la vapeur d'eau et retient l'humidité saturée de substances agressives, d'où l'apparition d'une couche pulvérulente sous ces encroûtements qui peut s'éroder sur plusieurs centimètres. On a observé lors de l'échantillonnage que sous les encroûtements noirs, il existe presque toujours une couche gypseuse pulvérulente dans laquelle sont inclus des fragments détachés de la roche sous-jacente qui peut alors s'éroder rapidement sur plusieurs centimètres. On remarque par la succession de phénomène de cristallisation et dissolution la fissuration et l'effritement de la pierre qui peut éclater, et des blocs entiers peuvent se détacher (cas observé par endroits le long de l'enceinte).

Les sulfates peuvent interagir avec les nitrates et les chlorures en produisant d'importantes dégradations des pierres monumentales (Benner et al, 1982). Donc, la présence de ces anions NO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} en combinaison avec l'eau engendre le plus de dégradation sur le monument et provoque la modification de la composition minéralogique de la pierre et son altération par le phénomène de cristallisation saline (Lazzarini et al, 1986). Ils causent également, par les processus répétés de cristallisation et de dissolution de la matière soluble, un changement du volume de la pierre (Torfs et al 1997), en donnant lieu à différentes formes d'altération observées sur les remparts, principalement la désagrégation et l'effritement de la surface de la roche et la formation des feuillets d'exfoliation (Amoroso & Fassina, 1983).

Ainsi, les sulfates, les nitrates et les chlorures affectent le matériel pierreux par les mécanismes de solution, migration et de cristallisation. Leurs origines sont liées aux processus chimiques d'altération naturelle de la roche en contact avec les agents atmosphériques enrichis par les polluants et les sels

marins. Le climat marin, avec ses caractéristiques d'humidité et les embruns marins, est un facteur local important contribuant à l'altération. La croûte noire obtenue par la sulfatation de la roche est la forme d'altération fréquente dans les pierres des murailles étudiées avec des intensités variables liées à leur position et à leur exposition à la pluie.

4- Analyses par SAA

L'analyse quantitative des métaux lourds des croûtes noires par SAA montre la présence des métaux lourds (tab. 6.5). Ces métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr et Zn) sont considérés comme catalyseurs des réactions d'oxydation de SO_2 (Uron et al, 1968 ; Rodriguez-Navarro, 1996) en acide sulfurique SO_4^{2-} (Sabbioni et al, 1996), lequel est responsable de la pluie acide et la sulfatation de la pierre (Urone et al, 1968).

	Pb (mg/l)	Cd (mg/l)	Ni (mg/l)	Cu (mg/l)	Cr (mg/l)	Zn (mg/l)
CBM	12064	2,5	3,07	0,52	0,38	57
CBCh	2329	172	10,27	0,29	0,22	80
CBMk	1886	280	2,62	0,44	0,26	64
CBJ	4260	146	0,25	0,26	0,34	68
CBF	218709	110	1,50	0,31	0,44	14
CBS	5518	325	7,69	0,51	0,25	78

Tab 6.5 : Dosage des métaux lourds des croûtes noires des portes de l'enceinte par SAA

La présence de ces métaux lourds confirme en partie l'apport de la pollution atmosphérique dans le processus de dégradation. Les teneurs élevées de Pb émanant principalement des rejets de gaz d'échappement confirment en partie l'apport de la pollution urbaine dans le phénomène de dégradation de la pierre monumentale de Salé.

5- Analyses par DRX

Les résultats de l'analyse des échantillons étudiés sont présentés dans le tableau 6.6 et par des diffractogrammes (voir annexes).

L'analyse de la pierre de carrière (BKD) par DRX (tab 6.6) montre deux phases cristallisées : la calcite et le quartz, les croûtes noires et les pierres altérées ont une composition semblable avec des différences de proportions. On constate le dépôt des cristaux exogènes à la composition de la roche saine (BKD). La précipitation des cristaux de gypse, bien visible par le microscope électronique à balayage, est en correspondance avec les analyses par CI qui montrent la présence des sulfates.

La calcite et le quartz sont présents dans tous les échantillons étudiés. La calcite, le cristal dominant dans tous les échantillons analysés (44-83%) à l'exception de l'échantillon de mortier de restauration (End) (33%).

La dolomite est présente dans les alvéoles (FBF), le mortier (EBS) et le mortier de restauration (End).

Le gypse paraît dans les croûtes, les pierres, les mortiers à l'exception de l'enduit EBCH et des alvéoles (FBF), alors que l'halite apparaît uniquement dans l'enduit EBCH.

Nom du composant	Calcite	Quartz	Dolomite	Gypse	Halite
CBM	83	10	-	7	-
CBF	50	38	-	12	-
CBCH	62	10	-	28	-
CBS	44	14	-	42	-
EBCH	87	9	-	-	4
FBF	63	21	16	-	-
EBS	72	22	4	4	-
BKD	80	20	-	-	-
BM	89	7	-	5	-
BF	62	31	-	6	-
End	33	64	4	-	-

Tab 6.6. : Minéralogie de quelques échantillons étudiés

On peut dire d'après ces résultats que tous les ions SO_4^{2-} détectés par CI sont attribués au gypse, parce qu'aucun autre minéral contenant SO_4^{2-} n'a été trouvé dans la croûte par DRX (Bugini, 2000). Cette conclusion est aussi confirmée par des essais expérimentaux menés par Rochens et al., (1988): sachant que le SO_2 atmosphérique est le principal élément responsable de la

présence du soufre dans les pierres calcarénites exposées à la pollution atmosphérique, et afin de comprendre l'effet de la pollution atmosphérique sur la pierre, il était nécessaire de déterminer sous forme de quel composé et suivant quelle réaction se fixe le soufre gazeux atmosphérique sur les monuments. Des expériences ont été établies sur deux types de pierres de la Cathédrale de Saint Rombusts (Mechelen, Belgique). Elles ont montré que la réaction de sulfatation est plus complexe, et que le dioxyde de soufre n'est pas le seul gaz impliqué.

En effet, les essais faits en caisson sur des pierres calcaires montrent que leur exposition à du SO_2 uniquement (1,6ppm) donne lieu à la formation du sulfite ($\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) et que le gypse n'est pas obtenu qu'après addition de NO_2 (1,6 ppm SO_2 +31 ppm NO_2). Les analyses par IRTF et ATG montrent que le gypse est la forme sous laquelle se trouve la quasi-totalité du soufre (Connor, 1992).

IV- Les facteurs d'enrichissement

1- Introduction

Les facteurs d'enrichissement sont communément utilisés comme outil d'interprétation en géochimie de l'atmosphère. L'idée est de considérer les aérosols atmosphériques, l'océan et les terres émergées (ces dernières sont assimilées à la surface de la croûte terrestre) comme trois types de sources majeures d'émission d'aérosols en terme de masse. Un élément chimique sert de référence pour chaque source : le Titanium (Ti) pour les aérosols provenant de l'atmosphère, le sodium (Na) pour les aérosols provenant de la source marine, et l'aluminium (Al) pour les aérosols crustaux ou terrigènes.

2- Principe

Les facteurs d'enrichissement permettent d'identifier le composant dû à la déposition de gaz atmosphériques et aérosols sur la surface de la pierre monumentale (croûte), le facteur d'enrichissement (FE) de plusieurs éléments par rapport à la pierre de Salé a été calculé à partir de l'équation suivante:

$$FE (X) = (X/Ti)_{\text{croûte noire}} / (X/Ti)_{\text{pierre de Salé}}$$

Où, X et Ti sont les concentrations d'élément X et de titanium dans les croûtes et la pierre d'origine « pierre de Salé », respectivement. La composition élémentaire moyenne de la pierre de Bouknadel identifiée par analyse FRX (Tab 6.3) est utilisée; le Ti a été utilisé comme l'élément indicateur (Sabbioni, 1995).

Les facteurs d'enrichissement en eau de mer et en minéraux de poussières du sol ont été déterminés en utilisant des formules analogues, avec Na comme l'élément indicateur de l'eau de mer et Al comme indicateur du sol (Schneider, 1987). La composition moyenne de l'eau de mer (tab.6.7) a été établie par Riley et Chester (1971), et la composition de poussière minérale (tab 6.8) par Mason (1966).

Composition chimique (%)	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ⁺	Ca ⁺	K ⁺
Eau de mer	55,04	30,61	7,68	3,69	1,16	1,10

Tab. 6.7 : Composition des particules marines en atmosphère propre (Riley et Chester, 1971)

Eléments	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
X/Al	0,35	0,26	1	3,41	3,2 10 ⁻³	1,6 10 ⁻³	0,32	0,45	0,62

Tab 6.8 rapports X/Al de la poussière du sol selon Masson (1966)

Le facteur d'enrichissement est un nombre sans dimension. Si sa valeur est égale à 1, l'élément considéré ne présente pas d'enrichissement par rapport à la composition moyenne du milieu de référence : il n'y a donc pas d'apport autre que ceux de la source choisie. Si son rapport est supérieur à 1, il y a un apport d'une autre source que de celle choisie. Ces sources incluent plusieurs activités principalement anthropiques. On parle dans ce cas d'enrichissement.

3- Résultats des facteurs d'enrichissement

a- Facteur d'enrichissement des croûtes noires par rapport à la pierre de Salé

Les résultats d'enrichissement des croûtes noires des pierres monumentales des portes de Salé par rapport à la pierre d'origine « pierre de

Salé » sont groupés dans le tableau 6.9 : L'enrichissement de la pierre de Salé a été trouvé pour le soufre S, le sodium Na et le potassium K et le magnésium Mg. Le S est très enrichi dans tous les échantillons excepté pour l'échantillon CBSB. Le Na est enrichi dans les échantillons FBF, CBM, CBF et CBS. Le K est peu enrichi dans les échantillons CBF FBF. Le Mg est peu enrichi en CBSB et CBM. Pour les autres éléments, les facteurs de l'enrichissement sont faibles, et n'indiquent presque aucune déposition (Fig.6.7).

	CBSB	FBF	CBM	CBF	CBS
Ca	0,30	0,27	0,67	0,27	0,50
Si	0,63	0,39	0,78	0,40	0,46
Fe	0,75	0,43	0,92	0,43	0,47
Al	0,64	0,40	0,91	0,40	0,46
Mg	1,12	0,58	1,57	0,59	0,75
Na	0,90	4,63	6,90	4,67	5,49
K	0,90	1,27	1,04	1,27	1,49
Sr	0,20	0,27	0,93	0,27	0,53
P	0,32	0,29	0,49	0,30	0,31
S	0,63	8,82	3,21	8,92	10,30

Tab. 6.9 : Facteurs d'enrichissement de la croûte noire par rapport à la pierre de Salé (Ti comme élément indicateur).

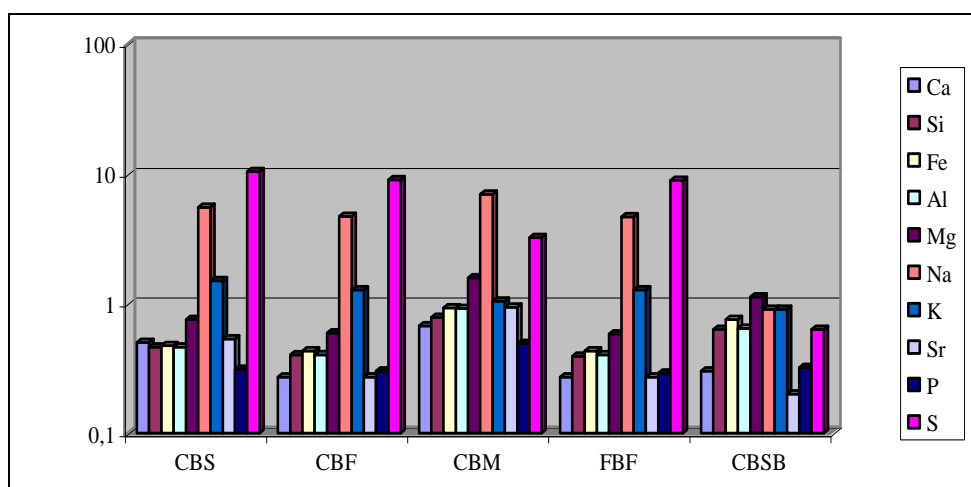


Fig. 6.7 : Facteurs d'enrichissement par rapport aux aérosols atmosphériques (Ti comme indicateur)

On peut dire que dans les croûtes et les alvéoles étudiées, le soufre S est l'élément ayant le plus grand facteur d'enrichissement, on suggère que se soit le principal élément attribuable à la déposition atmosphérique.

b- Facteur d'enrichissement des croûtes noires par rapport à l'eau de mer

Afin d'estimer l'importance des éléments dérivant de l'océan sur la roche, le facteur d'enrichissement de l'eau de mer est déterminé et les résultats de l'enrichissement des croûtes, des pierres et des alvéoles en sels solubles relatif à l'eau de mer sont présentés dans le tableau 6.10.

	SO₄²⁻	Cl⁻	K⁺
CBM	1085,37	13,63	1,01
CBSB	43,80	2,90	0,69
CBMk	604,11	4,43	4,05
CBJ	388,91	10,24	0,56
CBCH	4644,54	195,31	0,99
CBF	84,25	1,25	5,47
CBS	285,09	34,16	11,73
TSBA	115,33	7,44	11,26

Tab. 6.10 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires par rapport à l'eau de mer (Na⁺ comme élément indicateur)

Les facteurs d'enrichissement des ions de sulfates SO₄²⁻ sont les plus élevés (Fig.6.8), ce qui suggèrent que quelques ions de sulfates SO₄²⁻ proviennent de l'eau de mer, mais, les sources anthropiques sont plus importantes.

Les facteurs d'enrichissement élevés des ions de chlorures Cl⁻ de tous les échantillons excepté CBF, et le facteur d'enrichissement des ions de potassium K⁺ des croûtes CBMk, CBF, CBS et de la pierre TSBA (Fig.6.8), suggèrent la source marine comme une source secondaire à la pollution atmosphérique.

On peut dire d'après ces résultats, que l'apport des ions des sels solubles par l'influence maritime est important.

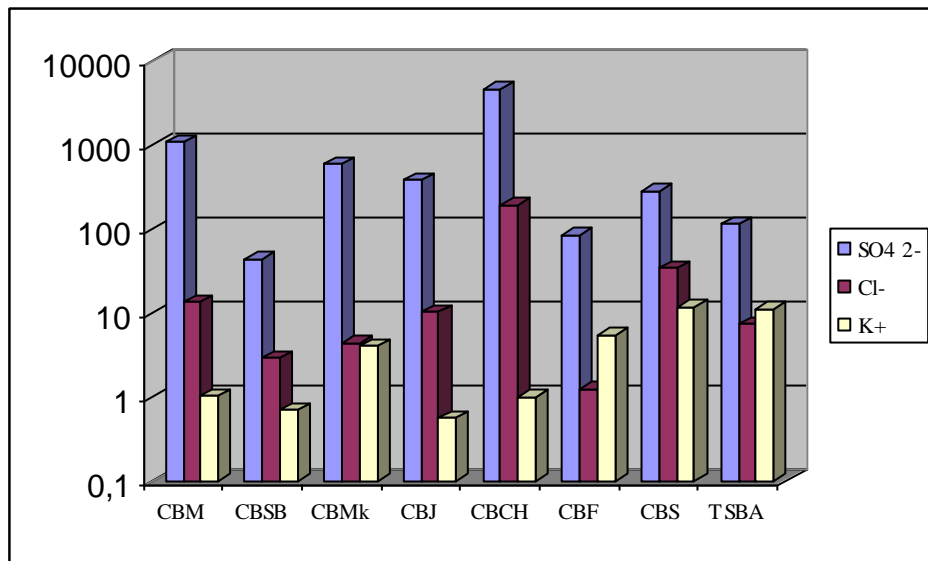


Fig.6.8 Facteurs d'enrichissement par rapport à l'eau de mer (Na⁺ comme indicateur)

c- Facteur d'enrichissement des croûtes noires et des alvéoles par rapport à la poussière du sol

Le tableau 6.11 présente les résultats des facteurs d'enrichissement des croûtes noires et des alvéoles par rapport à la poussière du sol.

	Ca	Si	Fe	Mg	Na	S	K	Cl
FBF	119,53	1,05	2,12	2,90	0,65	21,93	n.d	n.d
CBSB	17,52	0,94	1,67	1,63	1,13	11,41	0,41	164,23
CBM	27,29	0,81	1,46	1,61	2,44	41,41	0,33	298,14
CBF	28,33	0,94	1,55	1,38	3,75	261,23	0,93	351,56
CBS	39,83	0,94	1,47	1,51	3,80	259,87	0,94	428,45

Tab. 6.11 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires et effritement par rapport à la poussière du sol (Al comme élément indicateur)

Pour les éléments Si et K, le facteur d'enrichissement est presque 1, ce qui indique que la poussière du sol est leur source majeure. Les éléments Cl et Na sont enrichis dans tous les échantillons excepté pour l'échantillon FBF avec des valeurs d'enrichissement élevées de Cl par rapport à celles de Na. Les échantillons de croûtes montrent clairement un enrichissement en Ca et S (Fig.6.9).

Le soufre S est caractérisé par le facteur d'enrichissement le plus élevé, essentiellement dans les échantillons CBF et CBS, il peut être considéré comme le principal élément polluant qui interagit dans cet environnement, contribuant à la formation de croûtes. Le soufre S résulte des émissions industrielles au voisinage de la ville et du trafic routier (Maravelaki et al., 1992; Smith et al., 1994).

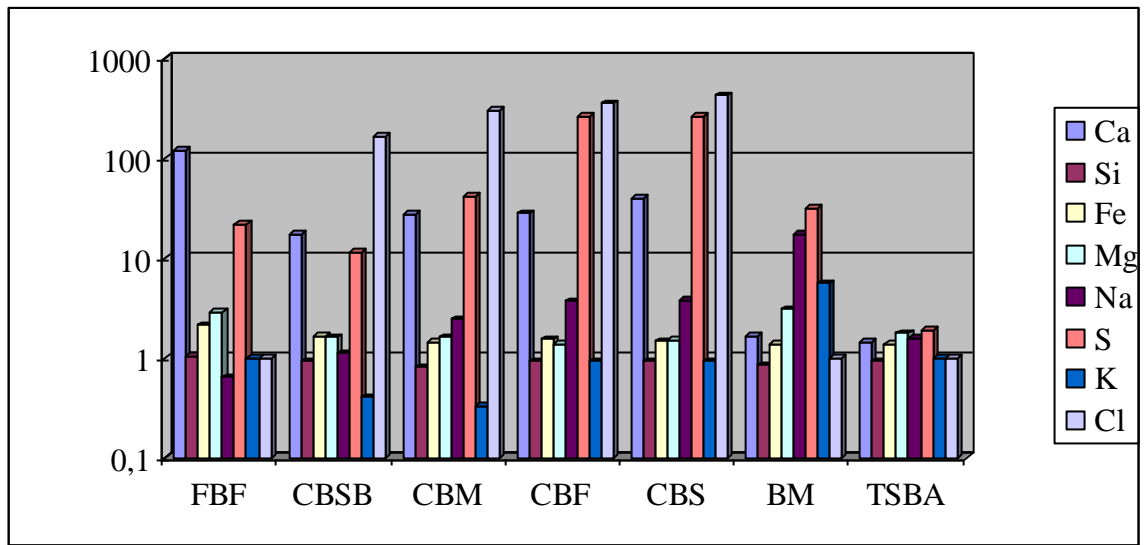


Fig.6.9 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires et de pierres par rapport à la poussière du sol (Al comme indicateur)

V- Conclusion

Les résultats de notre étude montre que les processus d'altération des pierres monumentales de Salé sont liés aux caractéristiques pétrographiques de la pierre monumentale, surtout, la porosité et la composition chimique carbonatée de la pierre, ainsi que la présence des sels solubles dans le système poreux. Les sulfates, les nitrates et les chlorures affectent la roche par les mécanismes de solution, migration, et cristallisation. La dégradation des roches par les sels s'accroît par la répétition des cycles dissolution-cristallisation, entraînant ainsi le dessertissage des grains constitutifs de la roche, ce qui modifie la porosité du matériau.

La cristallisation du gypse et de l'halite cause la fissuration, voire même, le détachement du bloc entier. Ces mécanismes déterminent les différentes

formes que peuvent prendre certaines dégradations comme les désagrégations, l'alvéolisation, l'encroûtement et les desquamations (Arnold et Zehner, 1989 ; Arnold, 1997 ; Hammecker, 1993 ; Jeannette, 1997).

La présence des sulfates, des nitrates, des chlorures et des métaux lourds dans la composition chimique de ces croûtes noires, indique une contamination de la pierre par des espèces exogènes d'origine atmosphérique et marine. Les réactions chimiques (sulfatation, dissolution) et les processus physiques (expansion volumique des sels, cristallisation) expliquent en partie les formes d'alvéolisation, de desquamation, de dissolution, observées sur les remparts et les portes de l'enceinte. La concentration de chaque élément diffère selon la position de la porte échantillonnée. La vitesse du processus de dégradation de ces remparts par les polluants atmosphériques est en grande partie favorisée par d'autres paramètres pétrographiques propres à la pierre, essentiellement les propriétés géotechniques, la porosité importante (20-45%) et la présence des carbonates de calcium solubles.

On peut dire que l'interaction de la roche et le dioxyde de soufre atmosphérique sont la base des altérations importantes observées sur les remparts de l'enceinte de Salé et que l'environnement joue un rôle primordial dans la dégradation de ces remparts.

Par la connaissance de l'environnement atmosphérique particulière et des propriétés pétrophysiques des matériaux pierreux, il est possible de justifier les altérations précédemment décrites par l'action des sels et de la pollution. Les résultats obtenus montrent deux processus chimiques différents qui opèrent dans l'interface roche - atmosphère : (1) la dissolution à l'intérieur de la roche résulte de la formation des croûtes denses à la surface de la roche ; (2) l'interaction des constituants atmosphériques et la dissolution de la matrice calcitique des roches qui causent la transformation de CaCO_3 en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ qui se piège dans le système poreux de la roche. Ceci confirme la grande interdépendance qui existe entre la dégradation de la pierre de Salé et la pollution atmosphérique. On peut

conclure que les formes d'altération observées sur les remparts de la ville de Salé sont principalement causées par les émissions de la pollution anthropique et de l'eau de mer.

L'analyse de la composition chimique en éléments majeurs par FRX nous a permis de constater que les matériaux inaltérés ont une composition chimique similaire, mais avec des textures différentes. Alors que les roches altérées montrent une différence de composition par le dépôt des éléments exogènes à la roche initiale (S, Cl, Ti), le soufre se présente généralement dans la roche sous forme de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le chlore peut provenir de deux sources différentes : les sels présents en suspension dans l'air et l'ascension capillaire des eaux souterraines, en particulier en zone côtière. Le titane Ti, métal lourd qui a pour origine l'activité routière, est un catalyseur des réactions de dioxyde de soufre atmosphérique. La présence de ces différents éléments exogènes confirme le rôle de la qualité de l'air dans le phénomène d'altération des roches monumentales (Zezza, 1996). Donc, les analyses effectuées sur des échantillons des produits d'altération (croûtes noires, pierres altérées et alvéoles) indiquent principalement l'influence d'activité anthropique et de l'eau de mer, on peut conclure que la détérioration chimique des remparts est principalement causée par les émissions anthropiques et les apports en aérosols de l'eau de mer. L'origine de ces différents éléments d'après les facteurs d'enrichissement montre deux sources majeures de ces éléments : la pollution atmosphérique et les embruns marins.

A large, horizontally-oriented oval with a marbled, light gray and white pattern. The oval has a thick black border and a subtle drop shadow effect. The text "CONCLUSION GENERALE" is centered within the oval in a bold, black, serif font.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

De par son passé prestigieux, on constate que dans la ville de Salé subsistent encore de nombreuses réalisations architecturales et monumentales qui méritent d'être sauvegardés et conservés en tant que patrimoine national. Cette richesse et cette diversité en monuments historiques exigent que des études divers (architecturale, scientifique, botanique...), doivent être faites, intéressant tous les monuments d'intérêt historique, pour sauvegarder et valoriser ce patrimoine.

L'observation des remparts de la médina de Salé révèle une construction de type médiévale avec un mélange d'aspect architectural ornemental par ses décorations, et défensif par ses tours et ses borjs. A cette fin, une panoplie de matériaux de construction a été employée : pierres appareillées, moellons, briques, bois et enduits traditionnels. La constitution de ces matériaux diffère selon qu'il s'agit d'une porte, d'une muraille, d'un borj, ou d'une tour. La richesse du substratum de la région offre ces divers matériaux, et permet encore son exploitation en cas de restauration. Ces caractères rendent cette enceinte d'une valeur importante sur le plan architectural ainsi que culturel.

L'étude générale des pathologies affectant les pierres monumentales nous a permis de révéler plusieurs formes d'altération (croûtes, décollement d'enduit, disjoints, prolifération de végétaux, desquamation, alvéoles, fissures), de déterminer les principales espèces florales peuplant les murailles, et de constater que les dégradations sont liées essentiellement à l'environnement et à la nature du matériau utilisé. Les relevés floristiques et la détermination des espèces végétales dominantes vont permettre au restaurateur de choisir des remèdes spécifiques et les herbicides convenables aux germes de ces espèces végétales sans endommager la pierre monumentale.

La détérioration de la pierre a des causes diverses : La qualité intrinsèque de la roche, son utilisation plus ou moins judicieuse, les facteurs climatiques, la prolifération des végétaux, et la pollution, déterminent directement la durabilité du matériau. En conséquence, nous ne parviendrons à conserver les remparts qu'en déterminant les principaux agents agressifs responsables de cette altération et d'essayer de délimiter leur action néfaste sur la pierre.

La caractérisation géotechnique des roches saines et des roches altérées montre une différence considérable entre les deux types. Ceci est lié essentiellement au changement du milieu d'exposition (du milieu rural à un milieu urbain). Ainsi, l'apport d'un milieu environnemental pollué dans l'altération des roches monumentales révèle une réponse négative, elle se manifeste sous différentes formes d'altération (désagrégation, alvéoles, décoloration,...) observées constamment sur les remparts de l'enceinte malgré les restaurations. On peut conclure que les processus d'altération causent des dégâts notables des propriétés mécaniques des calcarénites. En plus, la différence des caractères géotechniques au sein des roches saines dans une même formation impose un choix judicieux des niveaux exploités avant toute opération de restauration.

Quant à la reproduction expérimentale des pathologies observées sur les façades de l'enceinte par l'action des polluants (les sels et les acides), on s'aperçoit que les acides et les sels sont effectivement des paramètres responsables des principaux types d'altération (efflorescence, fissuration, décoloration, désagrégation) qui sont irréversibles. Ces modifications confirment ainsi le rôle des conditions environnementales dans le processus de dégradation, et apporte un plus aux restaurateurs, en indiquant les principales causes responsables d'altération, en particulier l'acide sulfurique, en essayant

dans un premier temps de diminuer l'activité du trafic routier aux alentours de l'enceinte, avant d'entamer les autres méthodes capables de rendre à l'enceinte son éclat et sa splendeur.

Les analyses chimiques révèlent la présence des sulfates, des nitrates, des chlorures et des métaux lourds dans la composition chimique des croûtes noires, des pierres et d'enduit en indiquant une contamination de la pierre monumentale par des espèces exogènes d'origine atmosphérique et marine. Les réactions chimiques (sulfatation, dissolution) et les processus physiques (expansion volumique des sels, cristallisation) expliquent en partie les formes d'alvéolisation, de desquamation, de dissolution ... observées sur les remparts et les portes de l'enceinte. Les sulfates, les nitrates et les chlorures affectent la roche par les mécanismes de solution, migration, et cristallisation. Leur action de dégradation des roches s'accroît par la répétition des cycles dissolution-cristallisation, entraînant ainsi le dessertissage des grains constitutifs de la roche qui modifie la porosité du matériau, et la cristallisation du gypse qui cause la fissuration, voir même, le détachement du bloc entier. La concentration de chaque élément chimique diffère selon la position de la porte échantillonnée. La vitesse du processus de dégradation de ces remparts par les polluants atmosphériques et les aérosols marins est en grande partie favorisée par d'autres paramètres pétrographiques propres à la pierre essentiellement aux propriétés géotechniques, la porosité importante (20-45%) et la présence des carbonates de calcium.

On peut dire que l'interaction entre la roche et le dioxyde de soufre atmosphérique est la base des altérations importantes observées sur les remparts de l'enceinte de Salé et que l'environnement joue un rôle primordial dans la dégradation de ces remparts. Ainsi, les analyses des échantillons étudiés (croûtes

noires, pierres, alvéoles, enduits et mortiers) indiquent principalement l'influence d'activité anthropique et de l'eau de mer, on peut conclure que la détérioration chimique des remparts est principalement causée par les émissions anthropiques et les apports en aérosols de l'eau de mer. Les facteurs d'enrichissement confirment ces résultats en indiquant deux sources majeures comme origine de ces différents éléments chimiques exogènes: la pollution atmosphérique et les embruns marins.

En conséquence, on peut dire que les processus d'altération des pierres monumentales de Salé sont liés aux caractéristiques pétrographiques de la pierre monumentale surtout la porosité, les caractéristiques géotechniques, la composition chimique carbonatée de la pierre, ainsi que la présence des sels solubles d'origine anthropique et marine dans le système poreux.

Liste des figures

- Fig. 1. Situation géographique de la ville de Salé
- Fig.2.1 Carte des domaines géologiques du Maroc.
- Fig.2.2 Stratigraphie des formations plio-quadernaires dans la région Rabat- Salé
- Fig.2.3 Coupe synthétique des formations plio-quadernaire de l'oued Bou Regreg à la bande littorale
- Fig.2.4 Carte géomorphologique de la région Rabat-Salé
- Fig.2.5 Carte de la sismicité historique du Maroc par siècle
- Fig.3.1 Localisation de la médina de Salé et des différentes portes de l'enceinte
- Fig.3.2 Les différentes parties d'une pierre appareillée
- Fig.3.3 Comportements télogénétiques théoriques d'une roche en œuvre
- Fig.3.4 (a) Schéma d'un moellon brut, (b) schéma d'un mur de moellons bruts jointoyés au mortier, enduits aux deux faces avec des pierres de tailles montées en ouvertures (portes, fenêtres) ou angle de chaînage.
- Fig.4.1 Schéma représentative du phénomène d'efflorescence
- Fig.4.2 Schéma représentatif des étapes (A et B) de la formation d'une alvéole
- Fig.4.3 Schéma représentatif de la formation de la croûte noire
- Fig.4.4 Les différentes zones observées dans l'air d'une remontée capillaire sur un mur, avec un modèle d'évolution des systèmes salins de la remontée capillaire basé sur les observations, la documentation et les analyses des surfaces de l'église de cuvent Mustair (Switzerland)
- Fig.4.5 Déformation de revêtement
- Fig.4.6 Cycle atmosphérique schématique des polluants. Une fois émis, les gazes peuvent être soit transportés dans la stratosphère
- Fig.4.7 Transformations physiques des particules dans l'atmosphère
- Fig.5.1 Fig.5.1.Roche de Bouknadel vue par la loupe binoculaire (Obj.4)
- Fig.5.2 Aspect de la croûte noire d'une pierre altérée (pierre de Bab Mrisa) vue au microscope électronique à balayage (MEB).
- Fig.5.3. Location des carrières Bouknadel et Mediouna
- Fig.5.4 Calcarénite du littoral atlantique : (A) pierre de Bouknadel, (B) pierre de Mediouna
- Fig.5.5 Photo montrant la roche de Bouknadel avant et après attaque par l'acide sulfurique à (a) l'œil nu et à la loupe binoculaire (b).

- Fig.5.5 Analyse par DRX des échantillons de roches saines et altérées par les essais de vieillissement
- Fig.5.7.1 Observation des pierres saines A et B par la loupe binoculaire.
- Fig.5.7.2 Observation des roches traitées (A₃ et B₃) par attaque l'acide sulfurique à l'œil nu (a) et (b), et par la loupe binoculaire (A₃ et B₃).
- Fig.5.8a Observation par MEB-EDX des cristaux de gypse formés dans la roche traitée Bouknadel (A₃).
- Fig.5.8b Observation par MEB-EDX des cristaux de gypse formés dans la roche traitée de Mediouna (B₃).
- Fig.5.9 Observation par la loupe binoculaire de l'aspect de la texture des roches traitées par des sels (A₂ et B₂).
- Fig.6.1 Photo par MEB-EDX de la roche de Bouknadel
- Fig.6.2 Photo par MEB-EDX de l'échantillon CBM
- Fig.6.3 Photo par MEB-EDX de la pierre de BM
- Fig.6.4 (a) et (b) Photos par MEB-EDX de l'échantillon BF
- Fig.6.5 Photos par MEB des pierres altérées : MBF1 montre une dissolution (a) et MBF2 une recristallisation des cristaux de calcite
- Fig.6.6 Photo par MEB d'échantillon d'enduit (EBCh).
- Fig.6.7 Facteurs d'enrichissement par rapport aux aérosols atmosphériques ; (Ti comme indicateur)
- Fig.6.8 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires et de pierres par rapport à la poussière du sol (Al comme indicateur)
- Fig.6.9 Facteurs d'enrichissement par rapport à l'eau de mer (Na⁺ comme indicateur)

Liste des Tableaux

- Tab.1.1 Liste des monuments historiques et des sites classés selon la Direction de culture
- Tab.1.2 Principaux monuments classés selon l'époque d'édification
- Tab.2.1 Valeurs mesurées des polluants atmosphériques à la ville de Salé
- Tab.2.2 Les caractères géotechniques de la carrière Al Brahma et la carrière de Bouknadel.
- Tab.3.1 Mesure de la longueur des remparts de la médina de Salé
- Tab.4.1 Distribution et importance des pathologies sur l'enceinte de la médina de Salé
- Tab.4.2 Distribution et importance des pathologies de Bab Sebta
- Tab.4.3 Distribution et importance des pathologies de Bab Mrisa
- Tab.4.4 Liste des monuments prospectés dans la médina de Salé et la carrière de Bouknadel.
- Tab.4.5 Liste des espèces récoltées entre Février et Mars 2003 et leurs familles
- Tab.4.6 Les altérations biologiques de la roche monumentale selon l'espèce biologique
- Tab.5.1 Masse volumique apparente des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)
- Tab.5.2 Porosité et Masse volumique absolue des pierres altérées (M) et des pierres saines (C)
- Tab.5.3 Résistance à la compression des pierres altérées (M) et saines (C)
- Tab.5.4 Capillarité des pierres altérées (M) et saines (C)
- Tab.5.5 Les caractéristiques des roches saines de Bouknadel et de Mediouna
- Tab.5.6 Mesure des variations de poids
- Tab.5.7 Dégâts visibles sur les roches de carrières après les essais de vieillissement
- Tab.6.1 Caractérisation des échantillons étudiés selon le site d'échantillonnage et les méthodes d'analyses utilisées
- Tab.6.2 Composition chimique en éléments majeurs par EDX
- Tab.6.3 Concentrations moyennes des échantillons des pierres altérées analysées par FRX
- Tab.6.4 Résultats de l'analyse des sels solubles des croûtes noires des portes de l'enceinte par chromatographie ionique

- Tab.6.5 Dosage des métaux lourds des croûtes noires des portes de l'enceinte par SAA
- Tab.6.6 Minéralogie de quelques échantillons étudiés
- Tab.6.7 Composition des particules marines en atmosphère propre
- Tab.6.8 Rapports X/Al de la poussière du sol
- Tab.6.9 Facteurs d'enrichissement de la croûte noire par rapport à la pierre de Salé (Ti comme élément indicateur).
- Tab.6.10 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires par rapport à l'eau de mer (Na⁺ comme élément indicateur)
- Tab.6.11 Facteurs d'enrichissement des croûtes noires et effritement par rapport à la poussière du sol (Al comme élément indicateur)

Liste des photos

- Photo.1.1 La porte monumentale et le patio de la medersa Mérinide
- Photo1.2 Façade extérieur de Bab Mrisa au XIV^{ème} siècle (a) et actuellement (b)
- Photo1.3 Rempart Sud de l'enceinte de Salé
- Photo1.4 Façade extérieur de Bab Antar
- Photo1.5 Porte de Fondouk Askour transformé actuellement en Tribunal
- Photo1.6 Porte de Zaouiïa Ennoussak
- Photo1.7 Fontaines de Bab Hssein
- Photo1.8 La Grande Sqala
- Photo1.9 Porte de Marabout Sidi Abdellah ben Hassoun
- Photo1.10 Façade extérieure de Bab Chaâfa
- Photo3.1 Borj El Kabir en forme de demi-cercle
- Photo3.2 Porte sculptée de Sqala Qdima
- Photo4.1 Aspects des croûtes noires sur les portes de l'enceinte de Salé
- Photo4.2 Tâches d'humidité et les croûtes blanchâtres sur la muraille Bab Sebta
- Photo4.3 Large fracture au sommet de la porte Bab Antar
- Photo4.4 (a, b) Aspects des alvéoles sur les pierres monumentales de l'enceinte de Salé
- Photo4.5 Désagrégation et érosion de la pierre appareillée de Bab Sebta (a) et de la muraille Borj Sidi Ben Achir (b).
- Photo4.6 Décollement en plaques de la pierre monumentale de Bab Sebta
- Photo4.7 Décollement d'enduit de la muraille de Bab Antar
- Photo4.8 Prolifération des végétaux après une courte période de restauration.
- Photo4.9 Utilisation des matériaux différents des matériaux d'origine (morceaux de briques (a), du ciment (b) et autres).
- Photo4.10 Prolifération des végétaux le long de façade intérieure de la muraille Bab Sebta (a) et dans la tour Bab Fès (b), le long des descentes d'eau (c) et au sommet des tours (d; e).
- Photo4.11 Prolifération des lichens au niveau des descentes de l'eau de pluie et dans les parties supérieures de l'édifice mouillées.

Références Bibliographique

- Aberkan, M. (1989). Etude des formations des marges du bassin du Gharb (Maroc Occidental). Thèse d'état. Univ. Bordeaux I. France, (1989), 290 p.
- Aberkan, M. and Legigan, P. (1984). Les dunes littorales Quaternaires dans le Rharb méridional, étude sédimentologique. Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine 35, pp31-44.
- Adam, J.P. (1983). Bilan d'une mission à Pompéi: causes de destruction et proposition de restauration d'un site antique, centre jean Bernard, Naples, 1983.
- Akil, M. (1980). Contribution à l'étude sédimentaire des formations littorales quaternaires de la région de Rabat (Maroc) ; thèse de 3^{ème} cycle. Univ. Med V, Rabat.
- Alaoui, I. et Mrini, D. (1997). Salé. cité millénaire, éditions Eclats, collection d'une ville; 199p.
- Alcalde, M. et Martin, A. (1990). Macroscopical morphology of accelerated deterioration of same petreous materials in Andalusian-Spain monuments, *in materiels de construccion*, Vol.40, n°218, abril/mayo/junio1990; pp5-27.
- Amoroso, G. G. and Fassina, V. (1983). Stone Decay and Conservation. Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection. Materials Science Monographs 11, Elsevier, Amsterdam.
- Arnold, A. (1997). Weathering and preservation of stone monuments. Methods of interdisciplinary approach. Scienze e materiali del patrimonio culturale (2). la pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale. R. A. Lefèvre éd. edipuglia, Bari, 9-19.
- Arnold, A. et Zehner K. (1989). Salt Weathering on monuments. Pro. Ist International symposium on the conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Ed F. Zezza, Grafo, Bari, pp31-58, 1989.
- Arnold, A., Kueng K., et Zehender K., (1986). Deterioration and conservation of Carolingian and medieval mural painting in the Müstair cuvent (Switzerland). In case studies in Conservation of Stone and Wall Painting, Bologna, II c, London, pp 190-194.
- AUS. (2006). Monographie de la région de Salé, Agence urbaine de Salé ().
- Azeroual M., Baghdad B., Bounakhla M., Doukkali A., El Wartiti M. (2006). Action de la pollution atmosphérique sur les monuments historiques: caractérisation et estimation de l'état de dégradation des remparts de la médina de Salé- Maroc. 3^{èmes Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement}, communication orale ; 8/10-Juin-2005, Faculté des sciences, El Jadida.
- Azeroual, M., Baghdad, B., El Wartiti, M., Naimi, M. & Taleb, A. (2003). Analyse-diagnostic des altérations météoriques et de biodégradation des monuments historiques de la ville de Salé. Etat actuel et rôle des facteurs environnementaux. *Rencontre Thématique Nationale de Recherche Scientifique des Sciences de la Terre*, 18-19 Avril El Jadida
- Azzoni, F. Baillo, E. Rodena et Zaninitti, A. (1992). Mechanical, chemical and petrographical evaluation of stone degradation induced by different laboratory techniques ; 7^{th international congress on deterioration and conservation of stone}, Lisbon, 15-18 june 1992, pp 827-836.
- Barby, A. (1994). Maroc. Guide bleu ; 475p.
- Beaudet, G. (1969). Le plateau central marocain et ses bordures. Etude géomorphologique. Thèse pour le doctorat es-lettres présentée a la faculté des lettres et sciences humaines de l'université de paris, édité par faculté des lettres et sciences humaines.
- Belliter, D., Narjis .R., Asebry .L. et Aberkan .M (1998). Evolution de la calcarénite dans les constructions ; vitesse d'altération en fonction des facteurs naturels et industriels ; Mines, *Géologie et Energie*, n°57, Rabat, pp83-88.
- Ben Boughaba, R. (2001). Etudes sédimentologiques, géotechniques, et géophysiques des formations littorales Plio-Quaternaire de l'axe Rabat-Kénitra (Maroc). Thèse Doctorat, Fac. Sc. Rabat, 223p.
- Benner, W. H., Bronzinsky R., Novakov T. (1982). Oxidation of SO₂ in droplets which contain soot particles. *Atmospheric Environment* 29, pp 3519-3526.
- Bensari, 1978. Connaissance géophysique du Maroc, thèse d'état ; Grenoble, 300p., 7 cartes.
- Benslimane, J.H. (1992). Le passé de la ville dans tous ces états. histoire, archéologie, archives; éditions Maisonneuve et la rose, 1992.
- Billioti, C. (1986). restauro del marmo opere e problemi ; Ed. Opuslibri. Firenze 1986, 10p.
- Bolleli, (1952). Hydrogéologie du Maroc, plaine du Rharb et région de la Mamôra. Notes et mémoires du Service géologique, N° 97, Maroc, pp 153-167.
- Boulet, C., Tanji, A. et Taleb, A. (1989). index synonymique des taxons présents dans les milieux cultivés ou artificialisés du Maroc central/ Actes Inst. Agro. Vét. Maroc, 9 (3&4), pp65-99.
- Bounakhla, M., Fatah, A., Embarch, K., Ibn Majah, M., Azami, R., Sabir, A., Nejjar, A., Cherkaoui, R., & Gaudry, A. (2003). Air pollution assesment of sale's city (Morocco). Journal

- Phys.IV, France, 107, EDP Sciences, les Ulis. (2003); pp211- 214.
- Bouyahyaoui, F. (1996). Etude géologique, minéralogique et techniques des marnes du Miocène supérieur à Pliocène inférieur de la région de Fès - Meknès et rabat – Salé. Fac. Sc. Rabat.233p.
- Buginia, B., Tabasso, M. L, Realinia, M. (2000). Rate of formation of black crusts on marble. A case study; Journal of Cultural Heritage 1. pp111–116.
- Camuffo, D., Del Monte C., et Vettorino O.(1982). Wetting, deterioration and visual features of stones surfaces in urban area. Atmospheric Environment 16, 1982, pp 2253-2259.
- Caneva, G et Salvadori.O (1988). Altération biologique de la pierre, in la dégradation et la conservation de la pierre, texte des cours internationaux de Venise sur la restauration de la pierre, CC/ 88/WS.8, pp 143-180.
- Chabas, A., Jeannette, D., Lefevre, R. A. (2000). Crystallisation and dissolution of airborne sea-salts on weathered marble in a coastal environment at Delos, Cyclades, Greece. Atmos. Environ. 34 (2), pp 219–224.
- Chauffriat, H. (1997). Préservation et restauration des monuments historiques et d'œuvres d'art, Haluka, Février 1997.
- Cogney, G. (1952). Recherches géologiques au confluent des oueds bou-regreg grou et akrech/ travaux édité par l'inconnu - paru en 1957.
- Connor, M. et Girardet, F. (1992). Etude du mode de fixation du soufre sur des grés calcareux ; 7 th international congres on deterioration and conservation of stone, Lisbon, 15-18 june 1992, pp 407- 416.
- Decrouez, D. (1992). les méthodes de conservation des marbres, in dossier d'archéologie N° 173 juillet/Août 1992, p159.
- Del Monte, Furlan (1995). Croûtes noires, sulfatation et dégradation de la pierre ; Actes du Congrès LPS Montreux, Conservation et restauration des biens culturels (1995), pp 349-369.
- Direction d'urbanisme, (2005). Développement durable de la ville de Salé. réalité et perspectives, journée d'étude du projet de Bou Regreg, 03/02/2005,Salé.
- DRIDE centre, PRQA région Centre, 2001
- El Aouene, M. (1983). Les monuments de Rabat et Salé par leurs archives, école des sciences de l'information, Rabat, 1983,184p.
- El Mrabet, A.T. (1991). Etude de la sismicité historique au Maroc de 1846 à 1960; thèse 3^{ème} cycle, Fac de lettres, Rabat; 340p +carte.
- Ericsson, P., Johansson, L.G., & Lindqvist, O. (1988). Chemical mecanismes of corrosion degradation of stones and metals , *Second Eurocare Congress*, Sevilla 3-4 Nov. (1988); 12p.
- Evans, I.S. (1969). Salt crystallization and rock weathering: a review. *Revue de géomorphologie dynamique* XIX, 1969(4), pp 153–177.
- Fally, S. (1999). La dégradation des monuments historiques à Bruxelles ;in la science et la ville, ULB - Faculté des sciences, Ed Fondations Lucia de Broukere D- 1997-5754/01, pp1-32.
- Fassina, V. (1988). Pollution atmosphérique et altération de la pierre. Etudes et documents sur le patrimoine culturel. La dégradation et la conservation de la pierre, UNESCO, 16, 91-142
- Froidevaux, Y.M.(1986). Technique de l'architecture ancienne construction et restauration, Ed Pierre Mardaga, Bruxelles 1986, 12p.
- Fronteau, Barbin et Pascal (1999). Impact de faciès sédimento-diagénétique sur l'altération en œuvre d'un géomatériau calcaire.
- Gigout, M. (1956) Recherches sur le Pliocène et le Quaternaire atlantique marocain. Trav. Inst. Sci. Chérif. Sr. Géol et Géogr phys., N°5.
- Guidotti S., Pithon M. (2019), Pollution de l'air extérieur : comprendre pour informer et prévenir, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedie-environnement.org/air/pollution-air-exterieur-informer-prevenir/>
- Hammecker, C. (1993). Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en oeuvre.*Thèse*, Université Louis Pasteur. 254 p., 3 planches photo.
- Herrero (1997). Altération des calcaires et des grés utilisés dans la construction, traduit en français par J. Stechelbault, Ed. Eyrolles Paris, 1967 ; 17p.
- Jahandiez, E. et Maire, R. (1931/32/34). Catalogue des plantes du Maroc, 3tomes, éd. Lechevallier, Paris, 913p.
- Jeannette, D. (1992a). L'altération des monuments. *Terroirs et monuments de France* sous la direction de Charles Pomerol. Editions du BRGM. 355-364.
- Jeannette, D. (1992b). Morphologie et nomenclature des altérations. In. *la conservation de la pierre monumentale en France*, les Presses du CNRS, éd., Paris, J. Philippon, D. Jeannette et R. A. Lefèvre, coordinateurs, 51-72.
- Jeannette, D. (1997). Structures de porosité, mécanismes de transfert des solutions et principales altérations des roches des monuments. Scienze e materiali del patrimonio culturale (2). La pietra dei monumenti in ambiente fisico e culturale. R. A. Lefèvre éd. edipuglia, Bari, 49-77.
- Johansson, L.G., Lindqvist, O., Mangio, R.E., (1988). Corrosion of calcareous stones in humid air containing SO₂ and NO₂, in. Air pollution and conservation, elseiver, 1988, pp 255-266.

- Keller, N.D., Frederickson, A. F. (1952). the role of plants and colloid acids in the mechanisms of weathering, *Amer. Journ. Sci.*, 250, 1952, pp 594-608.
- Korbendeau, Y. (1999). Maroc aux multiples visages; éditions ACR, 1999, 359p.
- Kowalski, WC.(1966). the interdependence between the strength and voids ratio on limestones and marls in connection with their water saturation and anisotropy. Proc.1st Int. Cong. Soc;Rock Mech. VolI; Lisboa, pp142-144.
- Krumbein, W.E. (1992). La détérioration des marbres, in *Archéologie* N°128 juin 1992, 29 p.
- Kumar, R. et Anuradha, V. (1999). Biodeterioration of Stone in Tropical Environments An Overview 1999.
- Laouina, A., Nafaa, R., Vaudour, J., et Watfeh A (1998). Le cordon littoral du Pleistocène supérieur de la Maamora (région de Salé, Maroc), évolution pédologique et géomorphologique ; *Et. Géogra. Phy.n° XXVII*, 1998, pp7-12.
- Laouina, A., Taillassane, M. et Watfeh, A. (1994). Mise au point sur la géologie du Plio-Quaternaire et les formations superficielles de la région de Rabat – Salé. *Rev. Géogr. Maroc*, vol.16, pp243-286.
- Lazzarini, L. & Tabbasso, M. (1986). *Il restauro della pietra*. CEDAM, Padova Ed. (1986), 319p.
- Mamilan, M. (1999). Restauration des bâtiments en pierre ; techniques de l'ingénieur, traité de construction, 24p.
- Manahan, S. E (1991). *Environmental chemistry* 5th edition, Lewis Pub
- Maravalaki, P., Biscotin G., Polloni R., Cecchetti W. et Zendri E. (1992). Investigation on surface alteration of limestone related to cleaning processes; 7th international congress on deterioration and conservation of stone, Lisbon, 15-18 june 1992, pp 1093-1100.
- Mason, B. (1966) *Principles of Geochemistry*. Wiley, New York.
- Muriel, M.J.V. (2000). Estudio de los materiales pétreos mas empleados en la construccion y conservaciones de los edificios de interes historico de Ciudad Rodrigo, Salamanca ; memoria de tesis doctoral, Universidad de Salamana, 322p.
- Normal 11(1985). assorbimento d'acqua per capillarita. Coefficient di assorbimento capillare; CNR-ICR. Roma. 1985.
- Norme NF, B10-503 (1973). Mesures de la porosité, de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente, Paris.
- Norme UNE 22-175 (1985). Granitos ornamentales. Resistancia a la compresion. IRANOR. Madrid. 1985.
- Pédro, G. (1993). Un phénomène naturel de la surface de la planète. l'altération des roches. In alteraciones de granitos y rocas afines M.A Vicente, E. Molina y Rives, Eds ; C.S.I.C., Madrid. Pp 17-50.
- Plenderleith H.J (1966). la conservation des antiquités et des œuvres d'arts, Ed. Eyrolles Paris V° 1966, 338p.
- Pottier–Alapette G. (1979–1981). Flore de la Tunisie Angiospermes- Dicotylédones gamopétales, 2 tomes.
- Pour la Science (1996). Dossier hors série: l'atmosphère.
- Quezel, P. et Santa, S. (1962-1963). Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales ; CNRS, Paris, 2tomes, 1170p.
- Rapport inéd. (1980). Etude de l'état de l'environnement de la médina de Salé, Direction de l'aménagement du territoire, dossier 5 « patrimoine culturel » (1980); 17p.
- Reille, M. (1979): Analyse polynique du lac de Sidi Boughaba. Littoral atlantique, Maroc. *Ecologia. Mediterranea*. N°4, pp61-65.
- Riley, J. P. and Chester, R. (1971). *Introduction to Marine Chemistry*. Academic Press, London.
- Rivas, T. (1996). Mecanismos de alteracion de rocas graniticas utilizadas en la construccion de edificios antiguos en Galacia. Tesis Doctoral. Fac. De biologia. Univ. De Santiago. 366p.
- Rochens, E., Leysen, L., Keppens, E. et Greiken, R.V. (1988). Air – pollution – induced chemical decay of the St.Rembouts cathedral in Mechelen, Belgium; Eurocare meeting in sevilla, Novembre 2- 3 ,1988.
- Rodriguez-Navarro, C. et Sebastian E. (1996). Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation. *The Science of the Total Environment* 187 (1996) 79-91.
- Saba M, Quiñones-Bolaños E.E, López A. L. B, (2018) A review of the mathematical models used for simulation of calcareous stone deterioration in historical buildings, *Atmos. Environ.* 180 156–166.
- Sabbioni, C. (1995). Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers. *Sci. Total Enuir.* 167, pp 49-55.
- Sabbioni, C., Zappia, G. et Gobbi, G. (1996). Carbonaceous particles and stone damage in a laboratory exposure system. *Journal of Geophysical Research* 101, pp 19621–19627.
- Schneider, B. (1987). Source characterization for atmospheric trace metals over Kiel Bight. *Atmospheric Environment* 21, pp 1275-1283.
- Smith, B. J., Whalley, W. B., Wright, J. et Fassina, V. (1994). Shortterm surface modification of limestone test samples: examples from Venice and the surrounding area. In: Fassina, V., Ott, H., Zezza, F. (Eds.), *The 3rd Symposium on Methodologies for the Analysis of Weathering and Conservation*, Soprintendenza ai beni artistici e storici di Venezia, pp. 217–226.

- Spweik et Johan P. (1997). Repointing Right/ Why using Modern mortar can damage a historic house- old house Journal. Vol. XXV, N° 4; pp46-51.
- Tadili, B. (1991). Etude du risque sismique dans le Maroc nord- Doctorat d'état. Fac Sc. Oujda, 250p.
- Taïlassane, M et Wafah, A.,(1992). Contribution à l'étude du Quaternaire littoral dans la région de Rabat-Salé. révision et reclassement des niveaux marins. Colloque internationale de préhistoire. « L'homme préhistorique » de Témara et ses contemporains du bassin méditerranéen. Témara du 21- -23 Sept 1992.
- Taleb, A. (1995). Flore illustrée des mauvaises herbes des cultures du Gharb. Doctorat d'Etat es-sciences agronomiques, Inst. Agro. V2T HASSAN II, Maroc, 2 volumes, 303p.
- Taleb, A. et Maïllet, J. (1994). Mauvaises herbes des céréales de la chaouïa (Maroc), Aspect floristique ; Weed Research, n° 34, pp 345- 352.
- Terrasses, Ch. (1972). Medersas du Maroc, éditions Albert Morancé, 1972,pp 1- 19.
- Torfs, K and Van Grieken, R.(1997). Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and stone decay layers on historic buildings at the Mediterranean coast. *Atmos Environ*;31:2179 –92.
- Torraca G. (1981). Porous building materials. In: materials science for architectural conservation. 3rd edition. ICCROM. 149p.
- Torraca G. (1986). matériaux de construction poreux; science des matériaux pour la conservation architecturale; ICCROM, Rome 1986; 149p.
- UNESCO (1999). Itinéraire culturel des Almoravides et des Almohades (Maghreb et Péninsule Ibérique), ministère des Affaires Culturelles, 1999, 515p.
- Urmenta, M.A., De Cueto Torres F.J.S. et Pozas J.M.M. (1992). Study of the porosity of monumental stone in Zamora (Espagne) ; *7th international congress on deterioration and conservation of stone*, Lisbon 15-18 June 1992, pp 811-817.
- Urone, P., Lutsep, H., Noyes C.M. and Parcher, J. (1968). Statistic studies of sulfur dioxide reactions in air. *Environ. Sci. Technol* 2, pp 611- 618.
- Vallet, M., Gosselin, C., Bromblet, P., Rolland, O., Verges-Belmin V. et Kloppmann, W. (2006). Origin of salts in stone monument degradation using sulphur and oxygen isotopes: First results of the Bourges cathedral (France) *Geochemical Exploration* 88, pp 358– 362.
- Villegas R., Martin, L., Vale, J.F. et Bello, M.A (1995). Caracterisation and conservation of the stone used on the cathedral of Grenada , Espagne, in *materiels de construccion*, Vol.45, n°240, octobre/novembre/décembre 1995; pp17-35.
- Watefah, A. (1996). Le plateau de la maamora et le littoral de Salé: les formations superficielles et évolution géomorphologiques; Publication du comité national de géographie du Maroc, série thèses et mémoires 1996, 390p.
- Wenkler, E.M. (1975). Stone: properties, durability in man's environment. 2^e Edition. Springer-Verlag (NW). 230p.
- Wernli, R. (1977). Les foraminifères planctoniques de la limite mio-pliocène dans les environs de Rabat. Maroc. Ecologie. Géol. Helv. Bâle. Vol 70/1; pp 143-191.
- Zeza, F. (1996). Marine spray and polluted atmosphere as factors of damage to monuments in the Mediterranean coastal environment. In: Zeza F. Ed. Bari. Origin, mechanisms and effects of salts on degradation of monuments in marine and continental environments. Protection and conservation of the European Cultural Heritage, E.C. Project, Report 4. (1996) p. 3–19.

Travaux réalisés

Publications

Azeroual M., El Wartiti M., Qarbous A., Baghdad B., Bounakhla M. (2017). Assessment of Air Pollutant Sources in Deterioration of the Ancient Rampart of Sale City-NW Morocco (SW of the Mediterranean Basin). *J. Mater. Environ. Sci.*, 2017, Volume S, Issue S, Pages : 4907-4914.

Azeroual M., Baghdad B., Bounakhla M., Doukkali A., El Wartiti M. (2007). Impact de la pollution anthropique et des aérosols marins sur la pierre monumentale des portes de l'enceinte de Salé (Maroc). *Physical and Chemical News journal*, 33 Pages :59-64.

Communications

M. Azeroual, M. El Wartiti, A. Qarbous, B. Baghdad, M. Bounakhla (2018). Détermination des principaux polluants atmosphériques responsable de la dégradation de l'ancien rampart de la ville de Salé-NW Maroc- 1er Congrès international CIGREN 12 -13 Nov 2018 – Taza.

M. Azeroual, M. El Wartiti, A. Qarbous, B. Baghdad, M. Bounakhla (2018). Assessment of Air Pollutant Sources in Deterioration of the Ancient Rampart of Sale City-NW Morocco (SW of the Mediterranean Basin). 2nd International Conference on materials and environmental Science, ICMES 2018, 26-28 April Saidia.

Azeroual M., Baghdad B., Bounakhla M., Doukkali A., El Wartiti M. (2006). Application des méthodes analytiques élémentaires dans l'étude des monuments historiques : cas des remparts de la ville de Salé. *TANCA-01, Workshop sur les techniques analytiques, nucléaires et conventionnelles et leurs applications*. pp : 71. 8-9 Dec. 2006, Rabat.

M. Azeroual, B. Baghdad, M. Bounakhla, A. Doukkali, & M. El Wartiti. Monuments historiques de la médina de Salé – Maroc : Diagnostic des formes d'altérations et analyse chimique des pierres de construction. *Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen* .Poster. 26-28-Sept-2005, ENSAM, Meknès.

M. Azeroual, B. Baghdad, N. Zaouia & M. El Wartiti. Monuments historiques de la médina de Salé – Maroc : Morphologie et dégâts de l'altération expérimentale sur les matériaux pierreux. *Rencontre Internationale sur le Patrimoine Architectural Méditerranéen*. Communication orale. 26-28-Sept-2005, ENSAM, Meknès.

M. Azeroual, B. Baghdad, M. Bounakhla, A. Doukkali, & M. El Wartiti. Action de la pollution atmosphérique sur les monuments historiques: caractérisation et estimation de l'état de dégradation des remparts de la médina de Salé- Maroc. *3èmes Journées Internationales des*

Géosciences de l'Environnement. Communication orale ; 8/10-Juin-2005, Faculté des sciences, El Jadida.

M. Azeroual, B. Baghdad, M. El Wartiti M. Naimi & A.Taleb. Analyse-diagnostic des altérations météoriques et de biodégradation des monuments historiques de la ville de Salé : Etat actuel et rôle des facteurs environnementaux. *Rencontre Thématique Nationale de Recherche Scientifique des Sciences de la Terre*. Poster; 18-19 Avril -2003 El Jadida.

B.Baghdad, **Azeroual**, M. Naimi, A.Taleb & M. El Wartiti. Rôles des facteurs environnementaux dans l'altération et la biodégradation des monuments historiques de Salé. Actes des deuxièmes Journées des Géosciences de l'Environnement. Communication orale; 13-14 Juin-2003, Kénitra.



Annexe 1

Les espèces florales récoltés selon le site d'échantillonnage

Espèce	Monument	face	ville
Lamarckia aurea (L.) MOEHCH	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Cichorium endivia L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Diplotaxis tenuisiliqua DELILE	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Sonchus oleraceus L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Mercurialis annua L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Chamaemelum fuscatum (BORT.) VASC.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Geranium rosa	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Delphinium peregrinum L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Emex spinosa (L.) CAMPD.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Erodium triangulare (FROSK.) MUSCH.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Buffonia tenuifolia L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Oxalis pes-caprae L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Leontodon saxatilis LAMK.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Ruta graveolens	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Verbascum sinuatum L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Chrysanthemum coronarium L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Hypericum tomentosum L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Lolium rigidum GAUD.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Euphorbia peplus L.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Stachys ocymastrum (L.) BRIQ.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Nicotiana glauca R.C. GRAHAM	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Misopates orontium (L.) RAFIN	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Silybum marianum (L.) GAERTNER	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Galium tricornutum WITH.	zaouiat Ennousak	intérieur	Salé
Mercurialis annua L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Sonchus oleraceus L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Fumaria agraria LAG.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Stellaria media (L.) VILL.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Anacyclus radiatus L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Oxalis pes-caprae L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Ricinus communis L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Parietaria mauritanica DUR.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Olea europa L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Bryonia dioica JACQ.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Mentha viridis L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Beta macrocarpa GUSS	Carrière Gourna	intérieur	salé
Lobularia maritima (L.) DESV	Carrière Gourna	intérieur	salé
Scolymus hispanicus L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Conyza canadensis (L.) CRONQ	Carrière Gourna	intérieur	salé
Sinapsis arvensis L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Nicotiana glauca R.C. GRAHAM	Carrière Gourna	intérieur	salé
Rubus ulmifolius SCHOTT.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Salvia officinalis L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
Raphanus raphanistrum L.	Carrière Gourna	intérieur	salé

<i>Avena sterilis</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Malva parviflora</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Diptotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Urtica dioica</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Phagnalon saxatile</i> (L.) CASS.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Ficus carica</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Emex spinosa</i> (L.) CAMPD.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Chamaemelum fuscatum</i> (BORT.) VASC.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Aster squamatus</i> HIER	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Adiantum capillus-veneris</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Cotyledon umbilicus veneris</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Chenopodium murale</i> L.	Carrière Gourna	intérieur	salé
<i>Erodium ciconium</i> (L.) L'HER.	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Melilotus sulcata</i> DESF.	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Misopates orontium</i> (L.) RAFIN	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Sonchus asper</i> (L.) HILL	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Cotyledon umbilicus veneris</i> L.	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Bab Sebta	Sommet	salé
<i>Lamarckia aurea</i> (L.)	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Diptotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Bromus rigidus</i> ROTH.	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) PERS	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Malva parviflora</i> L.	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Amberboa lipii</i> (L.) DC	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Olea europaea</i> L.	Muraille Sebta	Base	Salé
<i>Lamarckia aurea</i> (L.) MOEHCH	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Lotus corniculatus</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Amberboa lipii</i> (L.) DC	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'HER.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Anacyclus radiatus</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Achyranthes aspera</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Diptotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Chenopodium murale</i>	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Erodium triangulare</i> (FROSK.) MUSCH.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Emex spinosa</i> (L.) CAMPD.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Melilotus sulcata</i> DESF.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Brachypodium distachyon</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Malva parviflora</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Trifolium scabrum</i> L.	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Medicago polymorpha</i>	Muraille Sebta	sommet	Salé
<i>Conyza canadensis</i> (L.) CRONQ	qasbat Gnaoua	Sommet (côté mer)	salé
<i>Oxalis pes-caprae</i> L.	qasbat Gnaoua	Sommet (côté mer)	salé
<i>Mesembryanthemum crystallinum</i> L.	qasbat Gnaoua	Sommet (côté mer)	salé
<i>Urtica dioica</i> L.	qasbat Gnaoua	Sommet (côté mer)	salé
<i>Diptotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	qasbat Gnaoua	sommet (côté mer)	salé
<i>Centaurea sulphurea</i> WILLD	qasbat Gnaoua	sommet (côté mer)	salé
<i>Beta macrocarpa</i> GUSS	qasbat Gnaoua	sommet (côté mer)	salé

<i>Stellaria media</i> (L.) VILL.	qasbat Gnaoua	sommet (côté mer)	salé
<i>Chenopodium murale</i> L.	qasbat Gnaoua	sommet (côté mer)	salé
<i>Malva parviflora</i> L.	qasbat Gnaoua	Somme t(côté mer)	salé
<i>Hyoscyamus niger</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Plantago coronopus</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Lobularia maritima</i> (L.) DESV	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Cyperus rotundus</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Rhus pentaphylla</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Erodium ciconium</i> (L.) L'HER.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Salpichroa rhomboidea</i> MIERS	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Geranium rosa</i>	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Peganum harmala</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Sonchus asper</i> (L.) HILL	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Chenopodium murale</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Beta macrocarpa</i> GUSS	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Mesembryanthemum crystallinum</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Aizoon canariense</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Lotus corniculatus</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Delphinium peregrinum</i> L.	qasbat Gnaoua	intérieur	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Nicotiana glauca</i> R.C. GRAHAM	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Galium tricornutum</i> WITH.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Lolium rigidum</i> GAUD.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Phagnalon saxatile</i> (L.) CASS.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Achyranthes aspera</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Urospermum picrioides</i> (L.) SCOP. ex	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Bromus rigidus</i> ROTH.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Urtica urens</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Urtica dioica</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Erodium malachoides</i> (L.) L'HER.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Hedera helix</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Geranium dissectum</i> L.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Parietaria mauritanica</i> DUR.	Bab Fès	sommet	Salé
<i>Diplotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Misopates orontium</i> (L.) RAFIN	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Phagnalon saxatile</i> (L.) CASS.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Medicago polymorpha</i>	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Avena sterilis</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Urospermum picrioides</i> (L.) SCOP. ex	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Achyranthes aspera</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Erodium triangulare</i> (FROSK.) MUSCH.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Sonchus asper</i> (L.) HILL	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Astragalus hamosus</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Stellaria media</i> (L.) VILL.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Conyza canadensis</i> (L.) CRONQ	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Centaurea pullata</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé

<i>Scolymus hispanicus</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Parietaria mauritanica</i> DUR.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Geranium rosa</i>	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Chenopodium ambrosioides</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Bromus rigidus</i> ROTH.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Atropa belladonna</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Anacyclus radiatus</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Senecio vulgaris</i> L.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Melilotus sulcata</i> DESF.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Galium tricornerutum</i> WITH.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Diplotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Erodium triangulare</i> (FROSK.) MUSCH.	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Misopates orontium</i> (L.) RAFIN	Muraille bab Mrisa	Base	Salé
<i>Stellaria media</i> (L.) VILL.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Hyoscyamus niger</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Silybum marianum</i> (L.) GAERTNER	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Beta macrocarpa</i> GUSS	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Piptatherum miliaceum</i> (L.) COSSON	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Silene</i> sp	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Anacyclus radiatus</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Salsola kali</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Mesembryanthemum crystallinum</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Lotus corniculatus</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Frankenia laevis</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Plantago coronopus</i> L.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Geranium rosa</i>	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Limonium sinuatum</i> (L.) MILL.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Limonium thouini</i> VIV.	Borj Sidi Benachir	Côté de la mer	salé
<i>Lamarckia aurea</i> (L.) MOEHCH	Medersa mérinide	sommet	salé
<i>Urtica urens</i> L.	Medersa mérinide	sommet	salé
<i>Misopates orontium</i> (L.) RAFIN	Medersa mérinide	sommet	salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Medersa mérinide	sommet	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Medersa mérinide	sommet	salé
<i>Chenopodium murale</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Diplotaxis tenuisiliqua</i> DELILE	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Polycarpon tetraphyllum</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Misopates orontium</i> (L.) RAFIN	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Ornithopus isthmocarpus</i> (COSSON) DOSTAL	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Geranium rosa</i>	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Veronica polita</i> FRIES	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Brachypodium distachyon</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Oxalis pes-caprae</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Beta macrocarpa</i> GUSS	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Muraille Bab chaafa	Sommet	salé
<i>Convolvulus althaeoides</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Rhus pentaphylla</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Nicotiana glauca</i> R.C. GRAHAM	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Ficus carica</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé

<i>Verbascum sinuatum</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Notobasis syriaca</i> (L.) CASS.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Sinapsis arvensis</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Geranium dissectum</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Brachypodium distachyon</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Raphanus raphanistrum</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Plantago coronopus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Calendula arvensis</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Ajuga reptans</i> (L.) Scherb	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Leontodon hispidulus</i> (DEL.) BOISS.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Euphorbia peplus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Carduus pycnocephalus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Scolymus hispanicus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Anacyclus radiatus</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Erodium cicutarium</i> (L.) L'HER.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Mercurialis annua</i> L.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Lolium rigidum</i> GAUD.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Conyza canadensis</i> (L.) CRONQ	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé
<i>Cerastium glomeratum</i> THUILL.	Carrière Bouknadel	Face exploitée	salé

Annexe 2

Textes juridiques relatifs à la conservation des monuments Historiques

B.O. N° 104 Du 19 Octobre 1914- Page 786

Dahir du 10 Octobre 1914 portant classement comme Monuments Historiques
de l'enceinte de la ville de Salé

Article Unique : Les remparts, fortifications , bastions, de la ville de Salé comprenant : le Borj El Kbir, Bab Chaâfa, Bab Sebta, Bab Ferth, Bab Fès, Bab Mellah, Borj El Mellah, Bab Bouhaja, Bab Jdid, Bab Mâalka, Borj El Qdim, Borj El Ddid, sont classés comme monuments historiques.

Fait à rabat, le 19 Kaada 1332
(10 Octobre 1914)

M'hamed Ben Mohammed El GUEBBAS, Grand Vizir

Vu pour promulgation et mise à exécution:

Rabat, le 13 Octobre 1914

Le commissaire Résident Général

LYAUTEY

B.O. N° 104 Du 19 Octobre 1914- Page 786

Dahir du 10 Octobre 1914 portant classement comme Monuments Historiques
de l'Aqueduc de la ville de Salé

Article unique : L'aqueduc construit par les Sultans des VI^{ème} siècle et VIII^{ème} siècle de l'ère musulmane dans la partie comprise entre son entrée en ville et le lieu dit, Ras El Ma, est classé comme monument historique.

Fait à rabat, le 19 Kaada 1332
(10 Octobre 1914)

M'hamed Ben Mohammed El GUEBBAS, Grand Vizir
Vu pour promulgation et mise à exécution:

Rabat, le 13 Octobre 1914

Le commissaire Résident Général
LYAUTEY

Annexe 3

CHARTE INTERNATIONALE SUR LA CONSERVATION ET LA RESTAURATION DES MONUMENTS ET DES SITES

Le Deuxième Congrès International des Architectes et des Techniciens des Monuments Historiques, réuni à Venise du 25 au 31 mai 1994, a approuvé le texte suivant :

2-1 DEFINITIONS

Article 1

La notion de monument historique comprend la création architecturale isolée aussi bien que le site urbain ou rural qui porte témoignage d'une civilisation particulière, d'une évolution significative ou d'un événement historique. Elle s'étend non seulement aux grandes créations mais aussi aux œuvres modestes qui ont acquis avec le temps une signification culturelle.

Article 2

La conservation et la restauration des monuments historiques constituent une discipline qui fait appel à toutes les sciences et toutes les techniques qui peuvent contribuer à l'étude et à la sauvegarde du patrimoine monumental.

Article 3

La conservation et la restauration des monuments visent à sauvegarder tout autant l'œuvre d'art que le témoin d'histoire.

2-2 CONSERVATION

Article 4

La conservation des monuments historiques impose d'abord la permanence de leur entretien.

Article 5

La conservation des monuments est toujours favorisée par l'affection de ceux-ci à une fonction utile à la société ; une telle affection est donc souhaitable mais

elle ne peut altérer l'ordonnance ou le décor des édifices. C'est dans les limites qu'il faut concevoir et que l'on peut autoriser les aménagements exigés par l'évolution des usages et des coutumes.

Article 6

La conservation d'un monument implique celle d'un cadre à son échelle. Lorsque le care traditionnel subsiste, celui-ci sera conservé, et toute construction nouvelle, toute destruction et tout aménagement qui pourrait altérer les rapports de volumes et de couleurs seront proscrits.

Article 7

Le monument est inséparable de l'histoire dont il est témoin et du milieu où il se situe. En conséquence le déplacement de tout ou partie d'un monument ne peut être toléré que lorsque la sauvegarde du monument l'exige ou que des raisons d'un grand intérêt national ou international le justifient.

Article 8

Les éléments de sculpture, de peinture ou de décoration qui font partie intégrante du monument ne peuvent en être séparés que lorsque cette mesure est la seule susceptible d'assurer leur conservation.

2-3 RESTAURATION

Article 9

La restauration est une opération qui doit garder un caractère exceptionnel. Elle a pour but de conserver et de révéler les valeurs esthétiques et historiques du monument et se fonde sur le respect de la substance ancienne et de documents authentiques. Elle s'arrête là où commence l'hypothèse, sur le plan des reconstitutions conjecturales, tout travail de complément reconnu indispensable pour raisons esthétiques ou techniques relève de la composition architecturale et portera la marque de notre temps. La restauration sera toujours précédé et accompagnée d'une étude archéologique et historique du monument.

Article10

Lorsque les techniques traditionnelles se révèlent inadéquates, la consolidation d'un monument peut être assurée en faisant appel à toutes les techniques modernes de conservation et de construction dont l'efficacité aura été démontrée par des données scientifiques et garantie par l'expérience.

Article11

Les apports valables de toutes les époques à l'édification d'un monument doivent être respectés, l'unité de style n'étant pas un but à atteindre au cours d'une restauration. Lorsqu'un édifice comporte plusieurs états superposés, le dégagement d'un état sous-jacent ne se justifie qu'exceptionnellement et à condition que les éléments enlevés ne présentent que peu d'intérêt, que la composition mise à jour constitue un témoignage de haute valeur historique, archéologique ou esthétique, et que son état de conservation soit jugé suffisamment. Le jugement sur la valeur des éléments en question et la décision sur les éliminations à opérer ne peuvent dépendre du seul auteur du projet.

Article12

Les éléments destinés à remplacer les parties manquantes doivent s'intégrer harmonieusement à l'ensemble, tout en se distinguant des parties originales, afin que la restauration ne falsifie pas le document d'art et d'histoire.

Article13

Les adjonctions ne peuvent être tolérées que pour autant qu'elles respectent toutes les parties intéressantes de l'édifice, son cadre traditionnel, l'équilibre de sa composition et ses relations avec le milieu environnant.

2-4 SITES MONUMENTAUX

Article14

Les sites monumentaux doivent faire l'objet de soins spéciaux afin de sauvegarder leur intégrité et d'assurer leur assainissement, leur aménagement et leur mise en valeur. Les travaux de conservation et de restauration qui y est sont exécutés doivent s'inspirer des principes énoncés aux articles précédents.

2-5 FOUILLES

Article 15

Les travaux de fouilles doivent s'exécuter conformément à des normes scientifiques et à la « Recommandation définissant les principes internationaux à appliquer en matière de fouilles archéologiques » adoptée par l'UNESCO en 1956.

L'aménagement des ruines et des mesures nécessaires à la conservation et à la protection permanente des éléments architecturaux et des objets découverts seront assurés. En outre, toutes initiatives seront prises en vue de faciliter la compréhension du monument mis au jour sans jamais en dénaturer la signification.

Tout travail de reconstruction devra cependant être exclu à priori, seule l'anastylose peut être envisagée, c'est à dire la reconstitution des parties existantes mais démembrées. Les éléments d'intégration seront toujours reconnaissables et représenteront le minimum nécessaire pour assurer les conditions de conservation du monument et rétablir la continuité de ses formes.

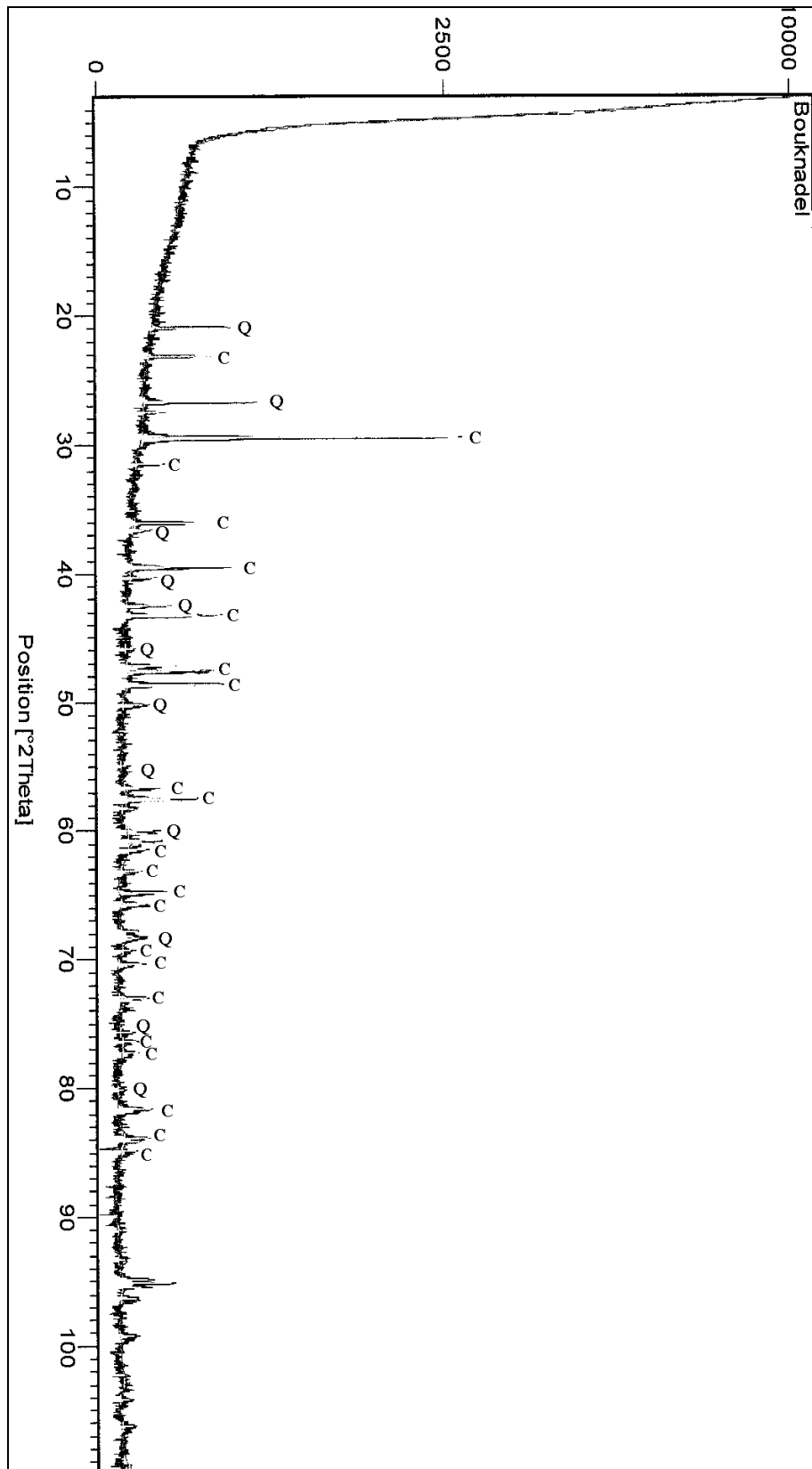
2-6 DOCUMENTATIONS

Article 16

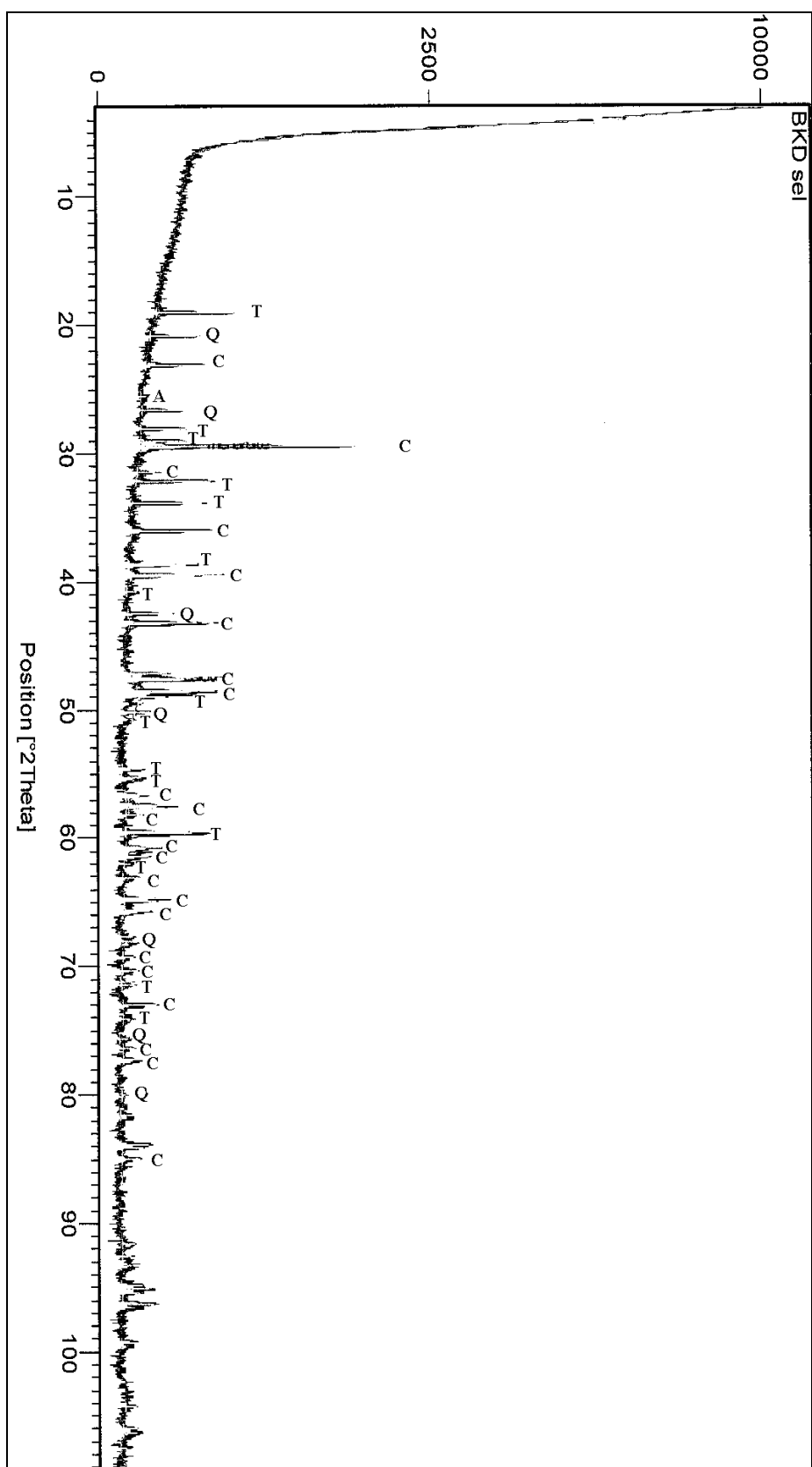
Les travaux de conservation, de restauration et de fouilles seront toujours accompagnés de la constitution d'une documentation précise sous forme de rapports analytiques et critiques illustrés de dessins et de photographies. Toutes les phases de travaux de dégagements, de consolidation, de reconstitution et d'intégration, ainsi que les éléments techniques et formels identifiés au cours des travaux y seront consignés. Cette documentation sera déposée dans les archives d'un organisme public et mise à la disposition des chercheurs ; sa publication est recommandée.

Annexe 4

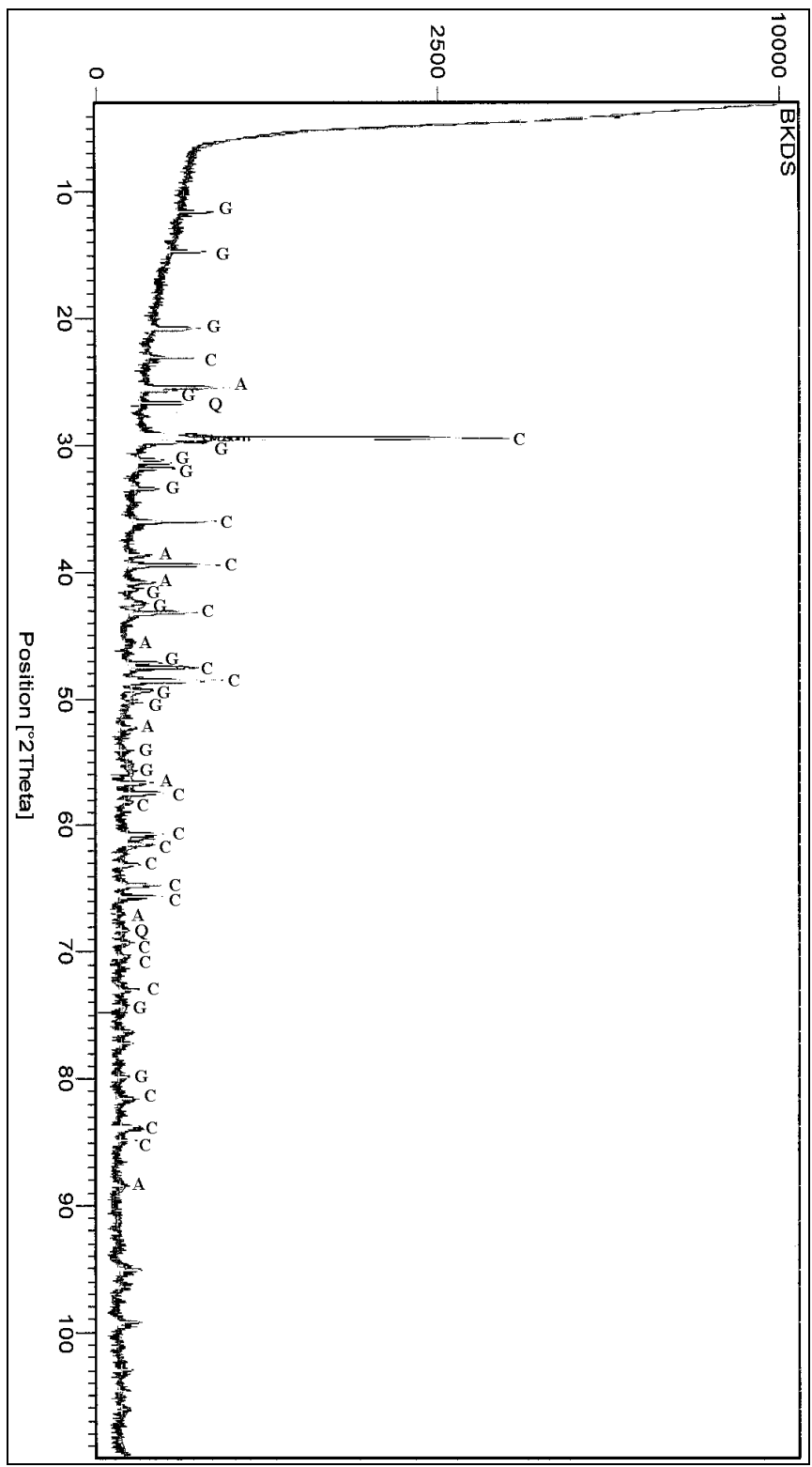
Diffractogrammes de l'essai de vieillissement



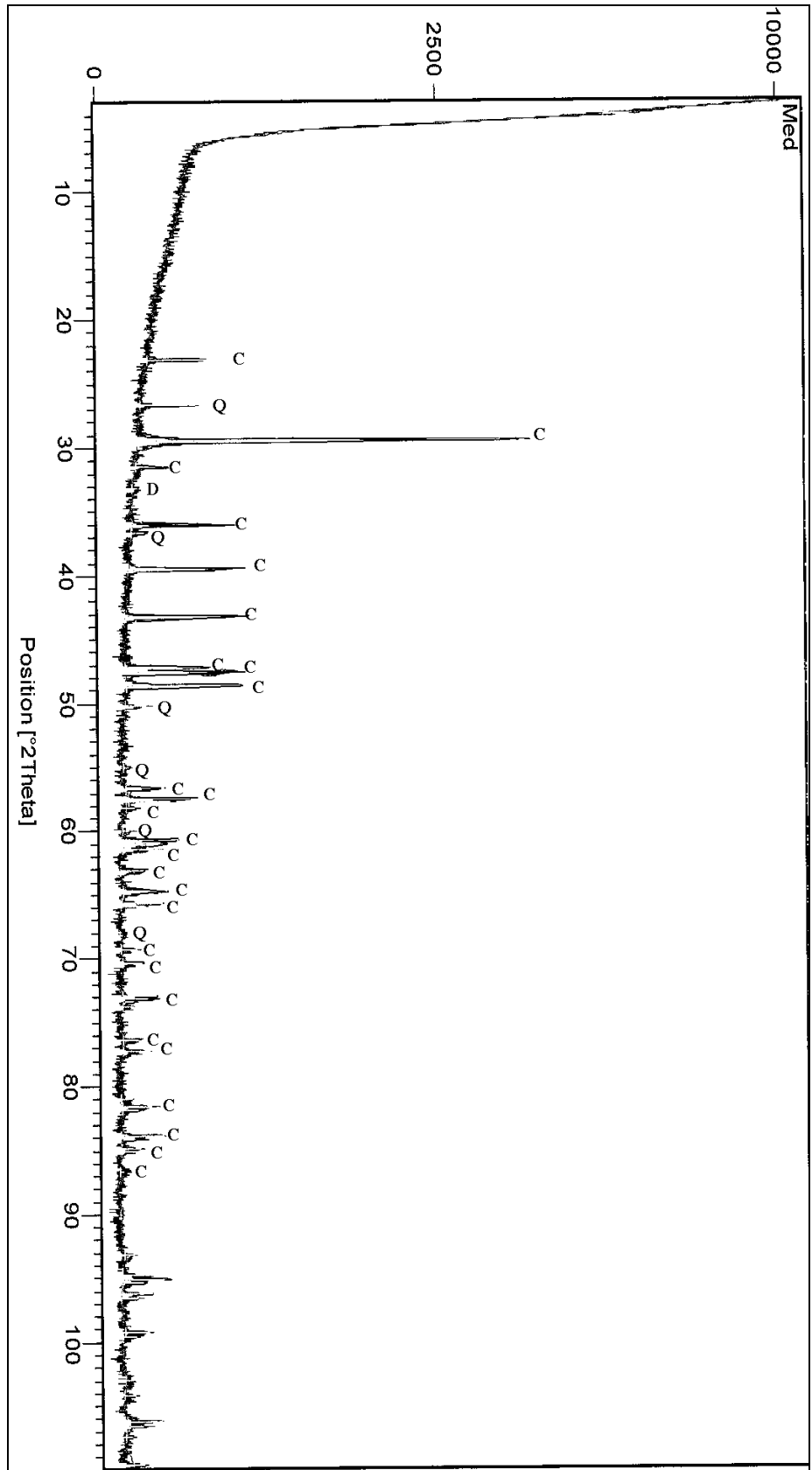
Diffractogramme de l'échantillon A par DRX



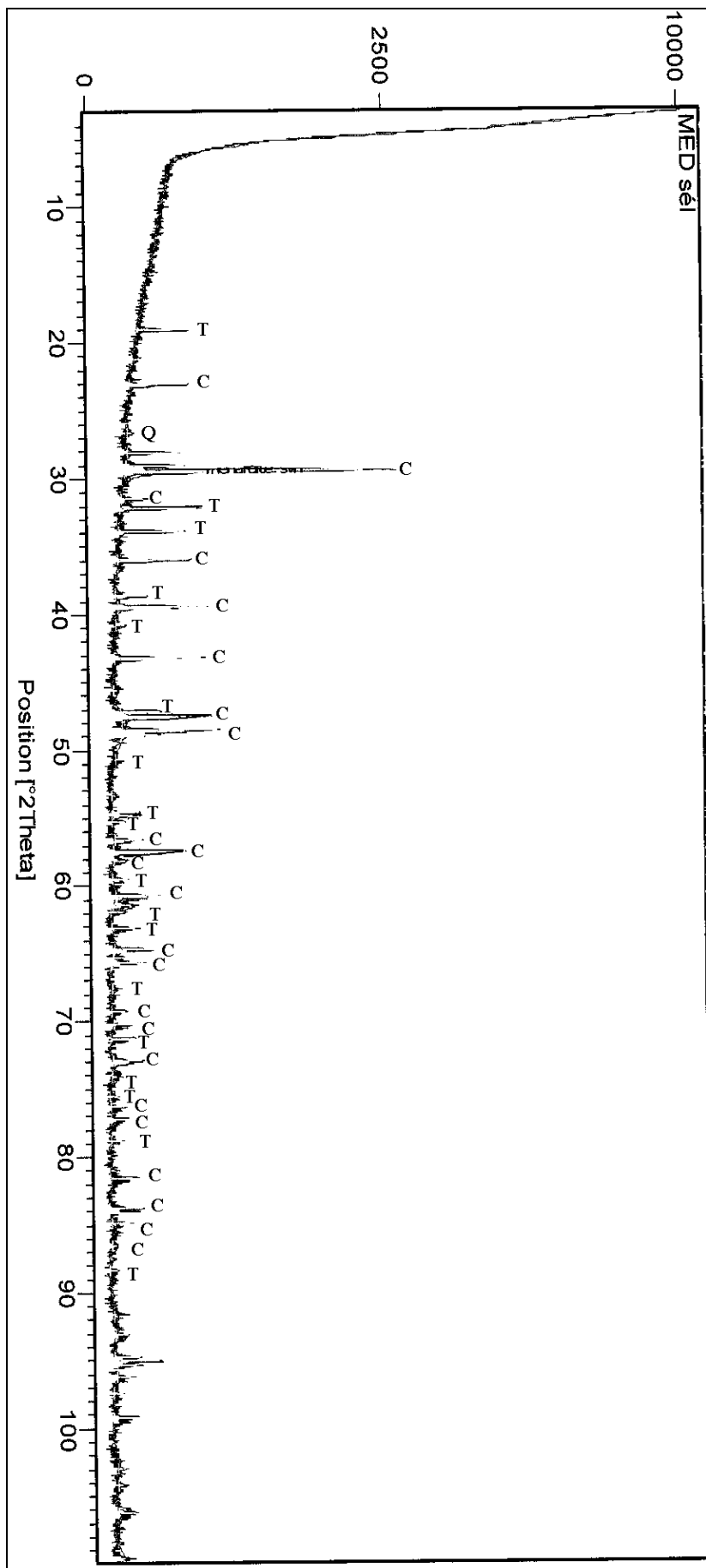
Diffractogramme de l'échantillon Ag_2 par DRX



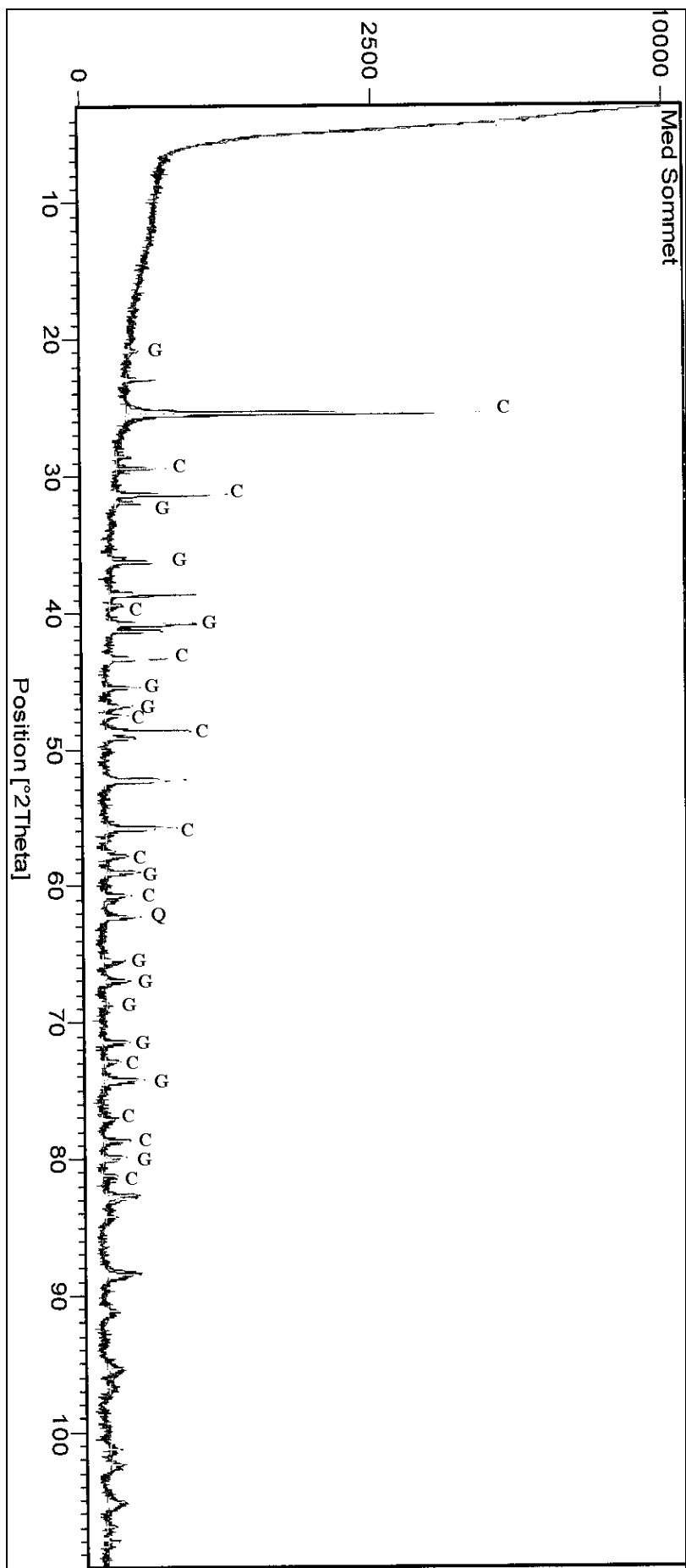
Diffractogramme de l'échantillon A₃ par DRX



Diffractogramme de l'échantillon B par DRX

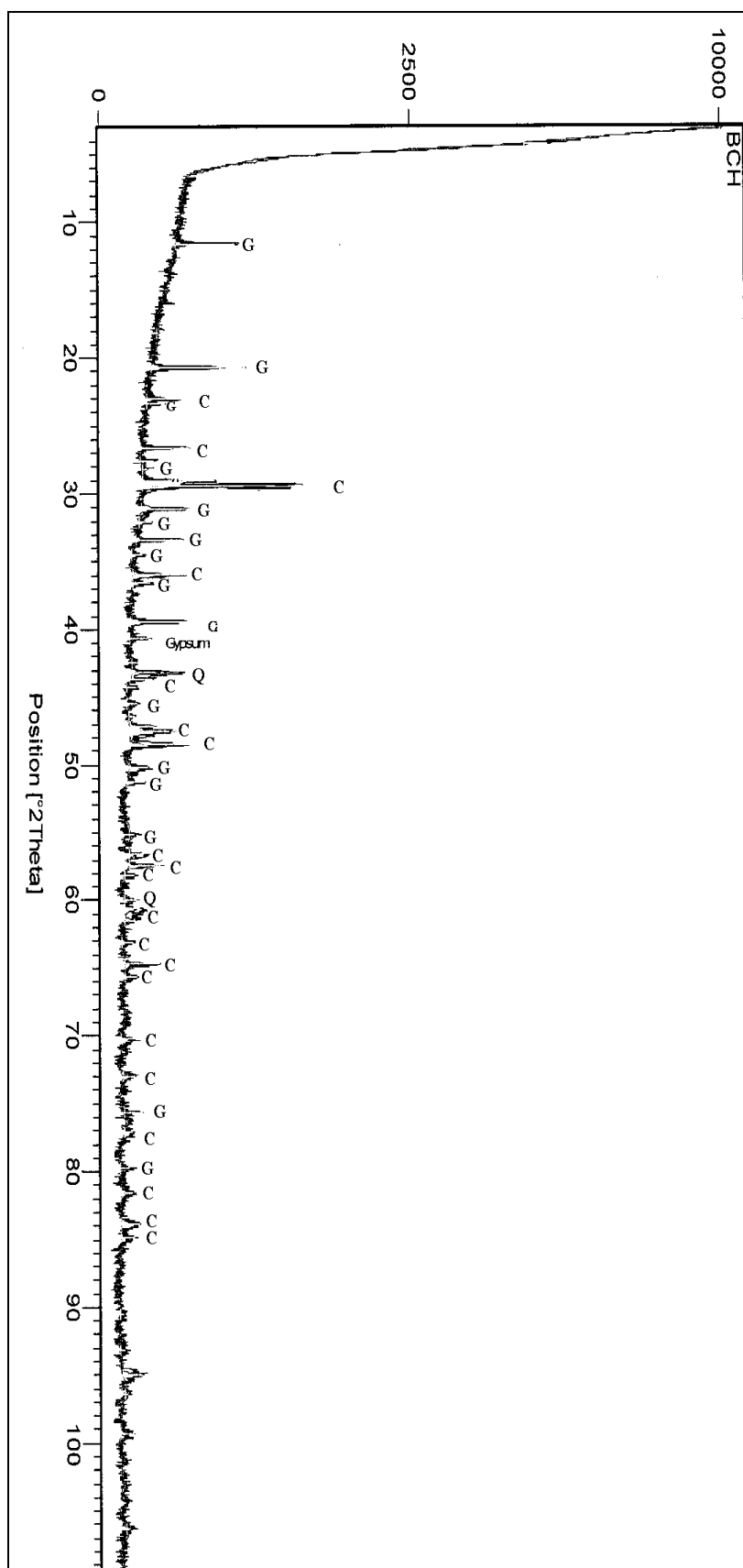


Diffractogramme de l'échantillon B₂ par DRX

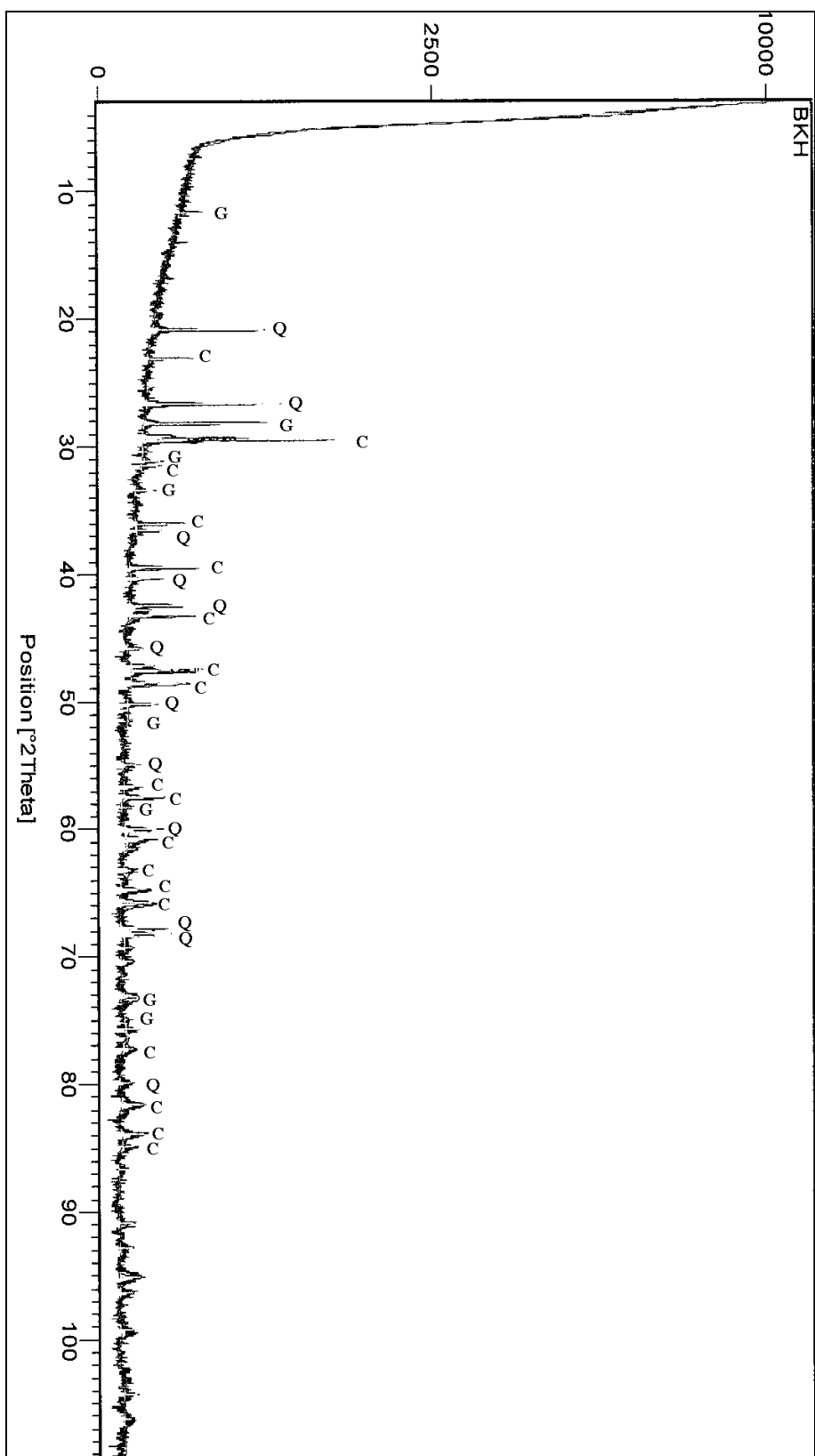


Diffractogramme de l'échantillon B3 par DRX

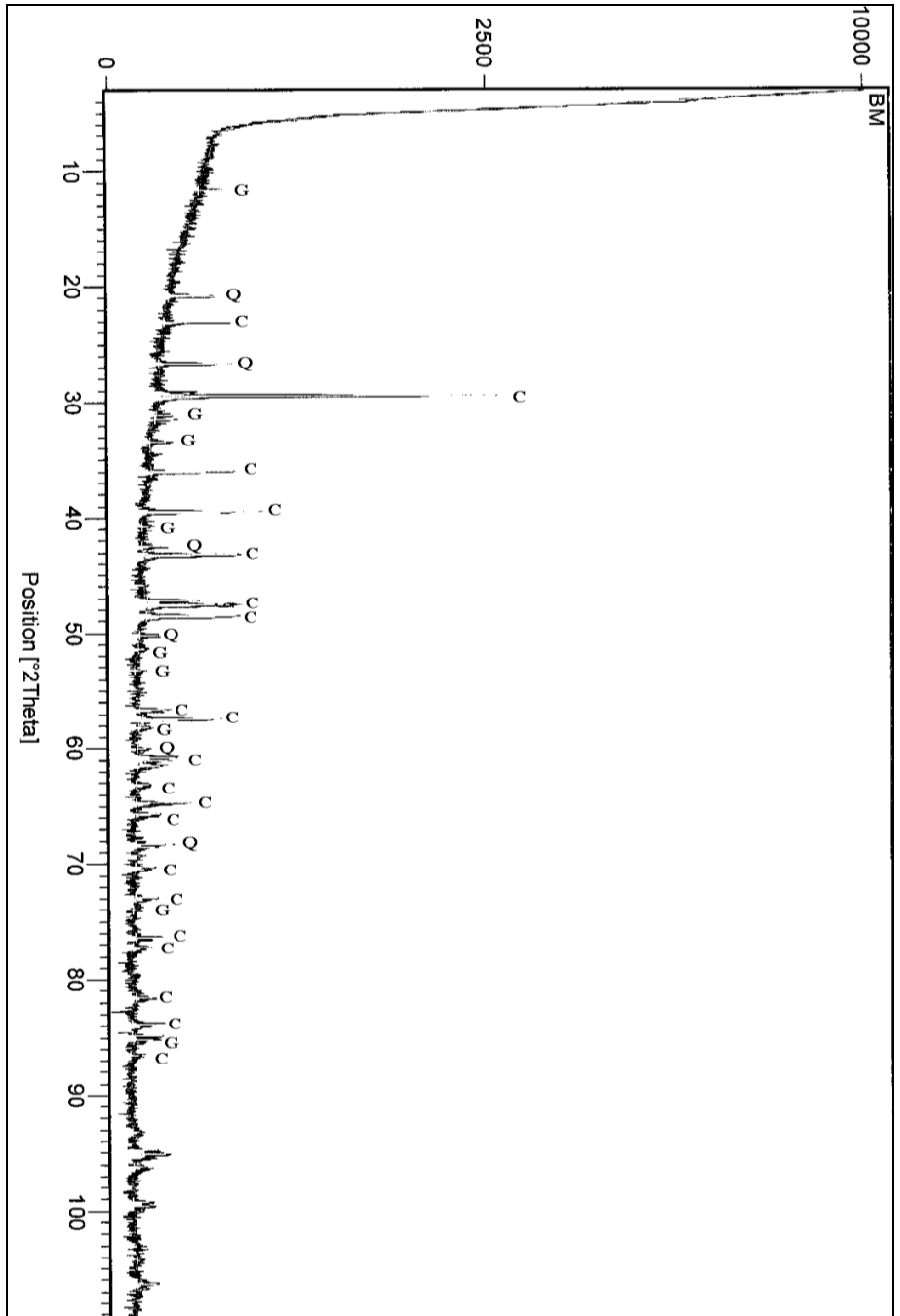
Diffractogrammes des échantillons altérés par DRX



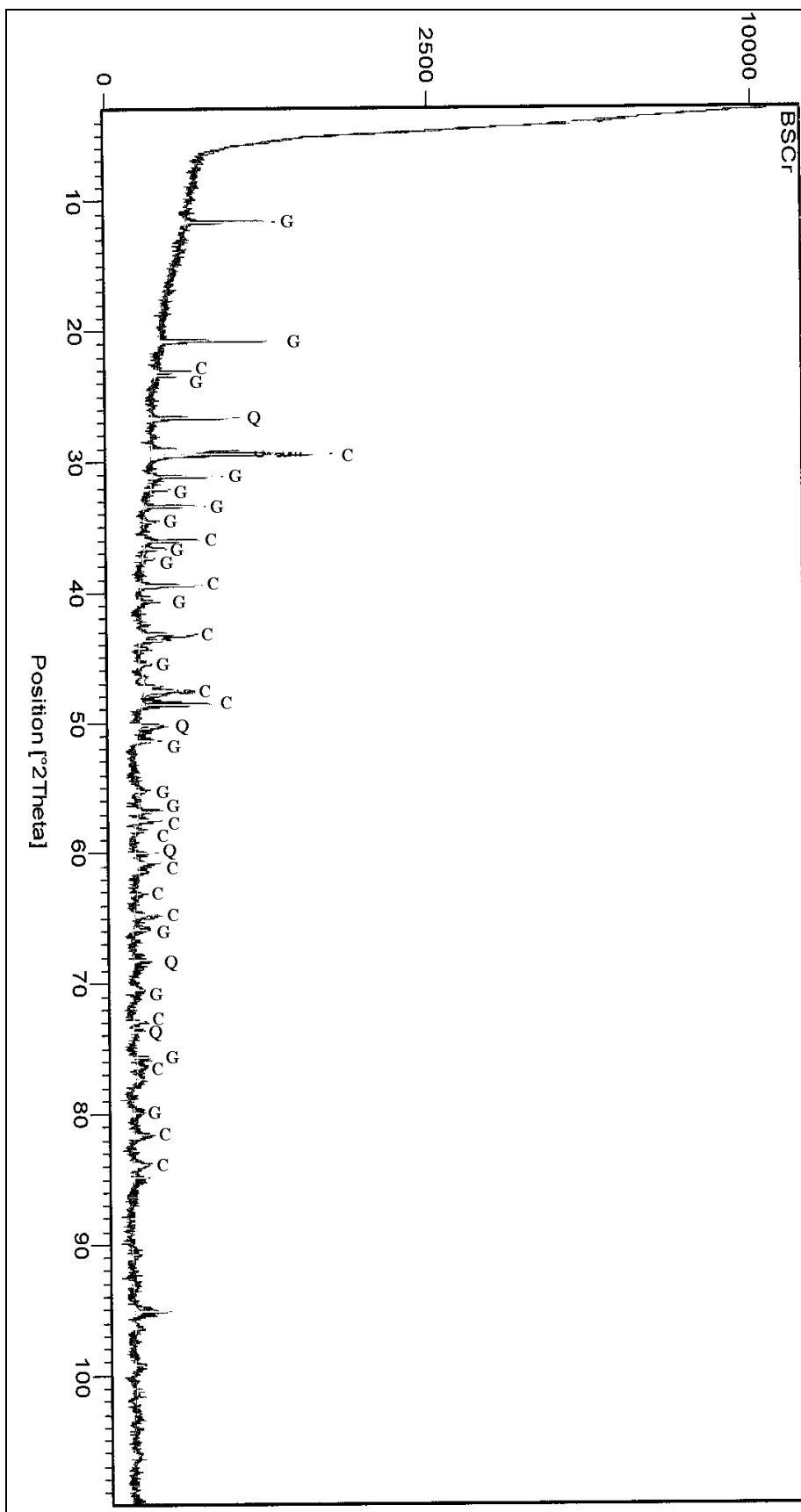
Diffractogramme de l'échantillon CBCH par DRX



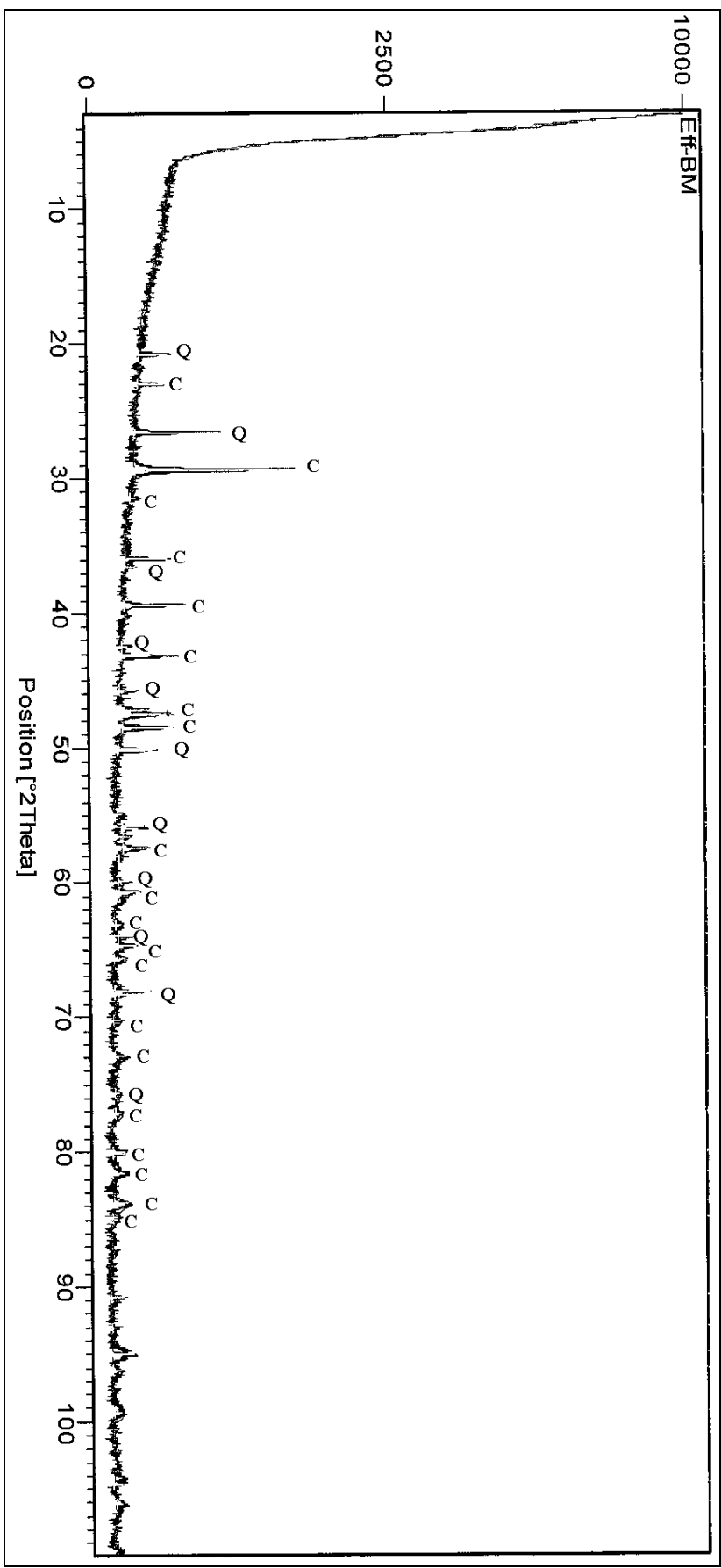
Diffractogramme de l'échantillon CBF par DRX



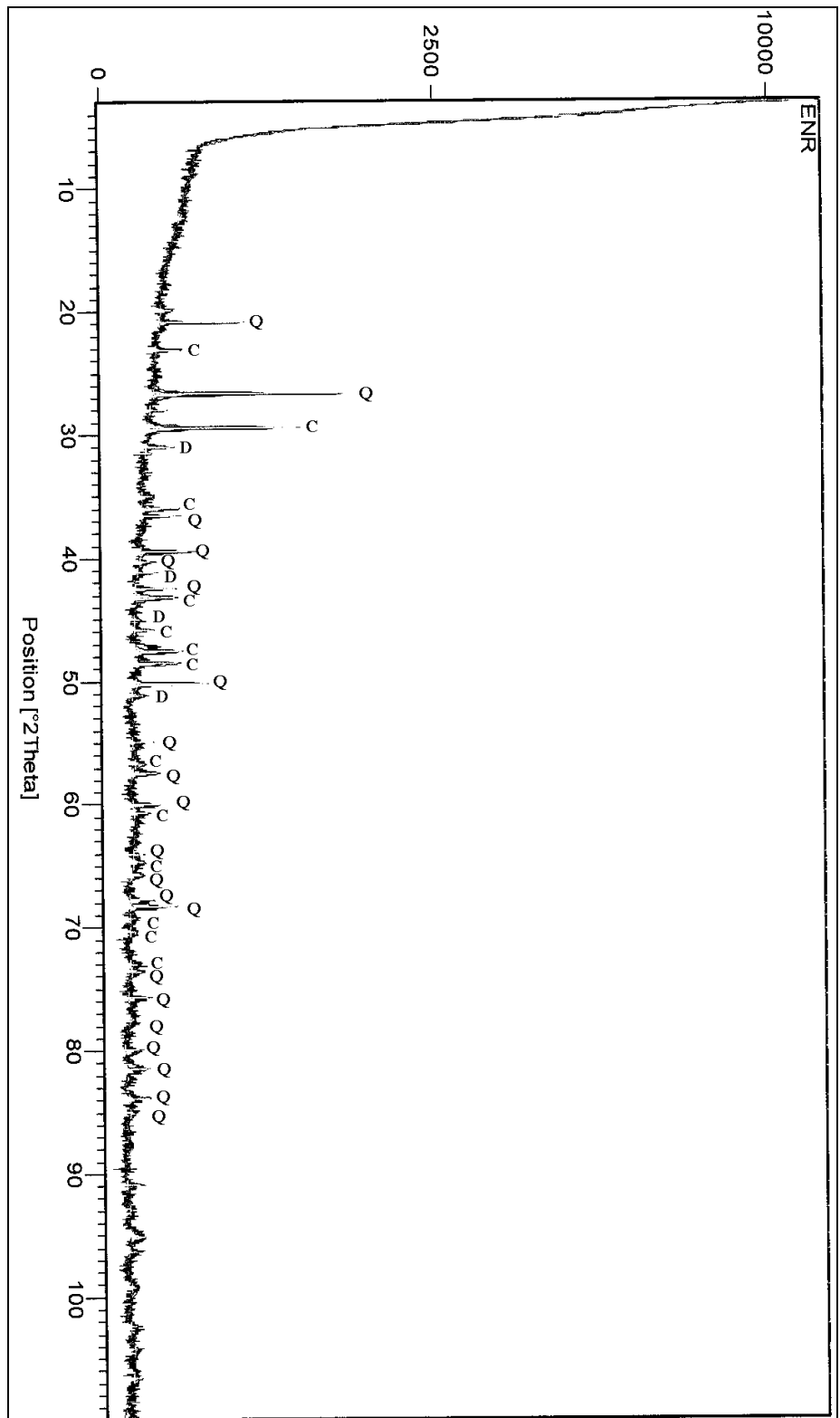
Diffractogramme de l'échantillon CBM par DRX



Diffractogramme de l'échantillon CBS par DRX



Diffractogramme de l'échantillon FBF par DRX



Diffractogramme de l'échantillon End par DRX