

Préservation du site archéologique de Volubilis (Maroc) : Caractérisation et étude des altérations des pierres principales du site

Dalal Badreddine^{1,2}, Issam Aalil^{1,2}, Kévin Beck¹, Xavier Brunetaud¹, Ali Chaaba²,
Muzahim Al-Mukhtar¹

dalal.badreddine@etu.univ-orleans.fr, issam.aalil@univ-orleans.fr, kevin.beck@univ-orleans.fr,
xavier.brunetaud@univ-orleans.fr, achaaba@hotmail.com, muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr

¹ Université d'Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, 45072, Orléans, France

² Université Moulay Ismail, ENSAM de Meknès, Marjane II - Ismailia B.P. 15290 Al Mansour, Meknès, Maroc

RÉSUMÉ. Volubilis est le site archéologique majeur de l'Afrique du Nord, construit au 3^{ème} siècle avant J.-C. Malheureusement, ce site classé par l'UNESCO présente des signes de dégradation avancée qui menace sa stabilité et sa durabilité. Des interventions sont nécessaires pour consolider et/ou restaurer les structures effondrées du site. Mais comme avant toute intervention sur un patrimoine historique, il est indispensable de réaliser une étude approfondie du monument, des matériaux de construction utilisés et de leur état de dégradation. Cette communication s'intéresse aux différents types de dégradations qui frappent les monuments du site et la caractérisation des deux pierres principales de construction de Volubilis : la calcarénite beige jaunâtre (dite également « molasse ») et le calcaire gris. Une comparaison des propriétés minéralogiques, physiques, hydriques et mécaniques des pierres permet de différencier les causes des altérations observées. De plus, cette caractérisation des pierres est importante pour le choix des matériaux de construction compatibles et durables pour la restauration des monuments de Volubilis.

ABSTRACT. Volubilis is the major archaeological site of North Africa, built in the 3rd century B.C. Unfortunately, the city, classified by UNESCO, is affected by several forms of degradation that threaten its sustainability and durability. Interventions are required to consolidate and/or restore the collapsed structures of the site. It is important, before any intervention, to make an in-depth study of the monument, the building materials used and their state of degradation. This paper focuses on the different types of alteration that affect the monuments of the site and the characterization of two main stones of the monuments of the Volubilis site: the beige yellowish calcarenite (also called "molasse") and the gray limestone. A comparison of the mineralogical, physical, hydraulic and mechanical properties of the stones allows to differentiate the causes of alteration observed. Moreover, the characterization of stones is important for the choice of compatible and durable building materials for the restoration of Volubilis monuments.

MOTS-CLÉS : Volubilis – Pierre calcaire – Caractérisation physico-chimique – Altération de la pierre – Patrimoine Bâti.

KEY WORDS: Volubilis – Limestone – Physico-chemical characterization – stone deterioration – Built heritage.

1. Introduction

1.1. Site de Volubilis

Volubilis est le site archéologique majeur de l'Afrique du Nord. Il est situé aux environs de la ville de Moulay Idriss Zerhoun à une trentaine de kilomètres au nord de la ville de Meknès au Maroc (Fig 1). D'une superficie de 42 hectares, le site est construit sur un plateau à la limite d'une vaste plaine et du massif montagneux de Zerhoun.

La ville de Volubilis fut fondée au III^e siècle av. J.-C. Elle fait d'abord partie du royaume Maurétanien puis devient un avant-poste important de l'Empire romain et l'un des sites les plus riches de cette période en Afrique du Nord. Période durant laquelle elle atteint son expansion maximale et connaît la construction de plusieurs monuments publics notables : le capitole, l'arc de triomphe, la basilique et le forum... La ville fut abandonnée au III^e siècle, à la chute de l'empire romain puis conquise par les Arabes au VII^e siècle, la cité devient musulmane, et Idris, fondateur de la première dynastie marocaine, s'y installe, avant de choisir Fès à 60 km comme capitale.

En 1915, des travaux de fouilles archéologiques et de restauration du site ont commencé [ALM 16], permettant de mettre en valeur plus de 20 hectares de la ville [DES 08]. La qualité de ces travaux a abouti à l'inscription du site de Volubilis sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO [UNE 97].

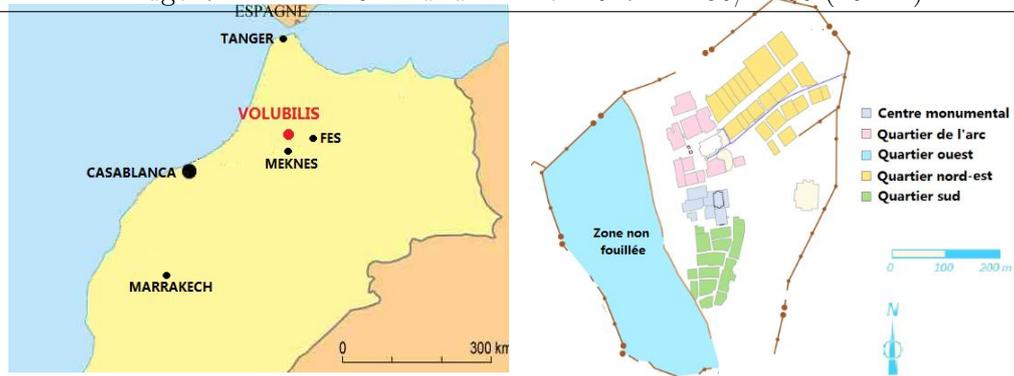


Figure 1 : Situation du site de Volubilis au Maroc et plan du site

1.2. Dégradations du site de Volubilis

Comme tout monument historique entièrement construit en pierre, le site de Volubilis a subi au fil du temps divers désordres générant des altérations au niveau des matériaux (pierres et mortiers) et au niveau de la structure des bâtiments. Il est donc nécessaire de prendre de mesures curatives et préventives pour limiter les dégradations des pierres, consistant à consolider les structures faibles, remplacer les pierres altérées mais aussi à restaurer les structures effondrées. Ces interventions doivent respecter les exigences définies par les chartes internationales (ICOMOS) qui insistent sur l'importance d'assurer la compatibilité des matériaux de restauration comme les pierres de substitution et les mortiers utilisés avec les pierres d'origine. À cet effet, une bonne connaissance des matériaux d'origine, de leurs caractéristiques et leur état de conservation est exigée. L'objectif de cette communication est d'étudier les pierres principales du site de Volubilis, d'évaluer leurs altérations et de les caractériser pour déterminer leurs propriétés minéralogiques, hydriques et mécaniques. Ces caractérisations sont nécessaires pour déterminer les pierres de substitution et les formulations de mortiers adéquats pour toute intervention de restauration.

2. Identification des pierres du site

Sur le site de Volubilis, des études pétrographiques ont permis l'identification des pierres constitutives du site et de déterminer leur pourcentage de représentativité. Six lithotypes principaux ont été identifiés [DES 08] : Calcarénite beige jaunâtre (60,2%), calcaires gris massifs (31,4%), calcaire marneux beige vert (2,6%), calcaire ocre gris (2,6%), dolomies grossières (1,7%), calcaires continentaux (1,5%). La majorité de ces pierres proviennent de carrières proches du site, situées à environ 5 km. Dans la suite de cette communication on se focalisera sur les deux pierres principales : la calcarénite et le calcaire gris qui représentent plus de 90% du volume total des pierres du site. La calcarénite est utilisée dans la majorité des bâtiments en tant que moellons de la maçonnerie, tandis que le calcaire gris constitue la majorité des monuments publics (La basilique, l'arc de triomphe, la porte de Tanger..). Les deux pierres sont également utilisées pour les éléments taillés et sculptés [DES 08].

3. Etude et comparaison des propriétés des pierres étudiées

La composition chimique et minéralogique des pierres a été déterminée par fluorescence X et par DRX. Les propriétés texturales des pierres ont été déterminées grâce à des mesures de porosité suivant le protocole indiqué dans la norme NF EN 1936. Les propriétés hydriques des pierres sont mesurées : la porosité à 48 h selon la norme NF B 10-504 et l'imbibition capillaire selon la norme NF EN 1925. Enfin, des tests complémentaires ont été menés pour identifier la conductivité thermique, la dureté, et la vitesse du son. Les figures 2 et 3 et le tableau 1 présentent une comparaison des caractéristiques minéralogiques, hydriques et mécaniques des pierres étudiées.

La calcarénite est une pierre de couleur beige jaunâtre tandis que le calcaire gris est de couleur beige grisâtre (Fig. 2). D'un point de vue minéralogique, les pierres sont toutes deux à base de calcite CaCO_3 et de quartz SiO_2 mais à des proportions différentes. Si la composition minéralogique est similaire, les analyses faites sur les deux pierres ont montré une très grande différence des caractéristiques hydriques et mécaniques. En effet, la calcarénite est une pierre plus poreuse comparée au calcaire gris. Ceci explique le comportement capillaire différent des deux pierres et le coefficient d'absorption capillaire élevé de la calcarénite (Fig. 3). La différence dans la composition minéralogique et dans la porosité induit une conductivité thermique plus faible et des propriétés mécaniques (résistance, dureté et vitesse de son) également moins élevés dans la calcarénite par rapport celles du calcaire gris. On constate également un écart plus important dans la vitesse du son entre l'état sec et l'état saturé dans la calcarénite, faisant de cette pierre plus sensible à l'eau que le calcaire gris.

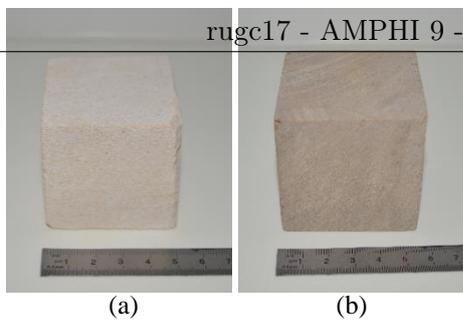


Figure 2 : Calcarénite (a) et calcaire gris (b)

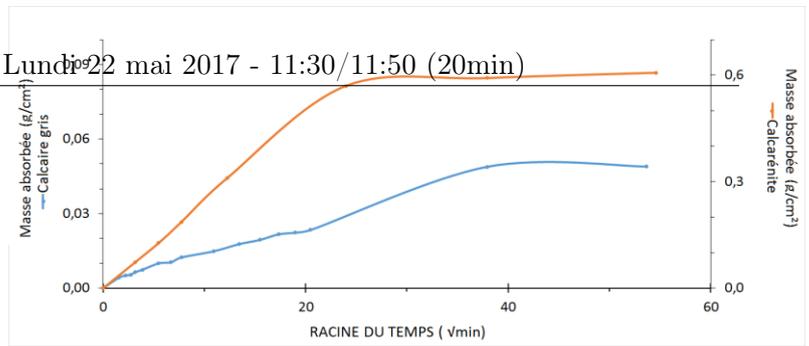


Figure 3 : Courbe d'imbibition des pierres étudiées

Tableau 1 : Propriétés minéralogiques, hydriques et mécaniques des pierres étudiées

		Calcarénite [AAL 14]	Calcaire gris
Composition minéralogique	Calcite	80-85%	90-95%
	Quartz	15-20%	5-10%
Porosité totale		17% ± 2%	5% ± 1%
Coefficient de capillarité		2 ± 0,53 kg/m ² .h ^{1/2}	0,08 ± 0,03 kg/m ² .h ^{1/2}
Degré de saturation à 48h		75% ± 6%	55% ± 2%
Conductivité thermique		1,2 ± 0,13 W/(m.K)	2,1 ± 0,16 W/(m.K)
Résistance mécanique		19 MPa	86 MPa [DES 08]
Dureté		387 ± 133 HDL	746 ± 191 HDL
Vitesse du son à l'état	Sec	3095 m/s	3851 m/s
	Saturé	3957 m/s	4423 m/s
	Ecart relatif	28%	15%

4. Etudes des altérations des pierres

4.1. Constatation des altérations

En se basant sur le glossaire illustré des figures d'altérations de la pierre produit par l'ICOMOS [ICO 10], les désordres et altérations constatés sur le site de Volubilis touchant la calcarénite et le calcaire gris sont:

Au niveau des constructions réalisées avec la calcarénite [AAL 16] :

- Colonisations biologiques : Il s'agit de lichens qui forment des recouvrements colorés sur les surfaces des pierres et produisent des acides qui peuvent réagir avec le calcaire présent dans la pierre.
- Détachements et pertes de matière : Ces altérations se manifestent sous forme de désagrégrations sableuses (détachements des grains de la pierre qui entraînent une accumulation poudreuse de sable), d'alvéolisations et de desquamations en feuillets (détachements d'écailles superficielles parallèles au parement).

Au niveau des constructions réalisées avec le calcaire gris :

- Fissurations
- Desquamations en plaques : Dues à une fissure parallèle à la surface de la pierre, la fissure entraîne la formation d'une plaque qui progressivement tend à se détacher.
- Patine noire : Il s'agit d'un épiderme superficiel plus ou moins induré qui induit un changement de couleur et de texture dans la zone superficielle.



Figure 4 : Exemples d'altération du calcaire gris (Fissuration du calcaire gris (a) et desquamation en plaque (b)) et de la calcarénite (desquamation en feuillet (c) et désagrégration sableuse (d))

Les mécanismes d'altérations observés de la calcarénite et du calcaire gris sont très différents. Ceci est dû principalement à la différence importante des propriétés physicochimiques et mécaniques des deux pierres. En effet, la cinétique de l'altération de la pierre calcarénite dépend beaucoup du comportement hydrique et du mouvement d'eau qui en est un vecteur principal des dégradations.

Pour la calcarénite, qui est relativement poreuse, il a été démontré que les sels solubles jouent, en présence d'eau, un rôle important dans sa dégradation [AAL 16]. En effet, l'analyse DRX d'échantillons de cette pierre altérés par désagrégation sableuse et par desquamation en feuillets indique une forte présence de sels solubles destructeurs tels la halite (NaCl) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) [AAL 16]. Ces sels, dissous dans l'eau, pénètrent dans le réseau poreux de la calcarénite et cristallisent provoquant ainsi une désagrégation de la pierre et une perte de matière.

Pour le calcaire gris, les études sont en cours afin de déterminer précisément les causes de dégradation de cette pierre. L'apparition des fissurations est probablement due aux propriétés texturales de la pierre ainsi qu'à la variation des conditions climatiques sur le site (température et humidité). Enfin, d'après les relevés météorologiques effectués sur le site, l'humidité relative varie entre 8% et 90% et la température fluctue entre 4°C et 48°C selon les saisons [AAL 14].

5. Conclusions et perspectives

Les données des recherches présentées dans cette communication font partie d'un programme de recherche Franco-Marocain soutenu par la Région Centre-Val de Loire, le projet « Préservation et valorisation du patrimoine antique marocain : Volubilis ». Dans cette communication, les deux pierres principales du site de Volubilis, la calcarénite et le calcaire gris, ont été étudiées. Des dégradations différentes sont observées sur les monuments construits avec les deux pierres. La caractérisation physico-chimique permet d'expliquer les altérations engendrées dans les deux pierres : la porosité plus forte et les propriétés mécaniques plus faibles dans la calcarénite provoquant une susceptibilité plus forte aux variations hydriques par rapport au calcaire gris. La caractérisation des pierres saines issues des carrières proches permet de sélectionner des pierres compatibles pour les travaux de restauration monuments du site.

Enfin, dans l'objectif de proposer des solutions d'intervention garantissant la durabilité et la stabilité des structures en respectant les exigences définies par les normes internationales, des formulations de mortier compatibles avec les pierres du site sont en cours. Ces mortiers sont à base de chaux dont la composition chimique est assez proche de celle de la pierre. Des études et analyses sont également menées sur ces formulations de mortier afin d'évaluer la durabilité et le degré de compatibilité de ces derniers avec les pierres d'origine.

6. Bibliographie

[AAL 14] AALIL I., CHAABA A., CHERKAOUI K., BECK K., BRUNETAUD X., AL-MUKHTAR M., "Pérennité de la Maison de Vénus du site archéologique de Volubilis (Maroc) : prédiagnostic, étude des altérations et caractérisation de la pierre prépondérante", *32èmes Rencontres de l'AUGC*, Polytech Orléans, 4 au 6 juin 2014.

[AAL 16] AALIL I., BECK K., BRUNETAUD X., CHERKAOUI K., CHAABA A., AL-MUKHTAR M., "Deterioration analysis of building calcarenite stone in the House of Venus in the archaeological site of Volubilis (Morocco)", *2016 Construction and Building Materials*, Volume 125, 30 October 2016, Pages 1127-1141.

[ALM 16] AL MUKHTAR M., CHAABA A., ATKI M., MAHJOURI R., DELEPHANCQUE R., BECK K., BRUNETAUD X., JANVIER R., CHERKAOUI K., AALIL I., BADREDDINE D., SAKALI A., "Preservation and Valorisation of Morocco's Ancient Heritage: Volubilis", *EuroMed 2016 - 6th International Conference on Cultural Heritage Documentation, Preservation and Protection*, Cyprus, 31 Oct. - 5 Nov. 2016, pages 160-167.

[DES 08] DESSANDIER D., ANTONELLI F., BOUZIDI R., EL RHODDANI M., KAMEL S., LAZZARINI L., LEROUX L. and VARTI-MATARANGAS M., *Atlas of the ornamental and building stones of Volubilis ancient site (Morocco)*, BRGM, 2008.

[ICO 10] ICOMOS-ISCS, Illustrated glossary on stone deterioration patterns, Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre 2010. [En ligne], https://www.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf

[UNE 97] UNESCO, Inscription : site archéologique de Volubilis, Maroc, 1997. [En ligne], <http://whc.unesco.org/archive/1997/whc-97-conf208-17f.pdf>

[VAL 11] VALLET J.-M and BROMBLET P. with the collaboration of BOUZIDI R, DAEHNE A., DESSANDIER D, EL RHODDANI M., KAMEL S., LINKE J., *Guide for the stones conservation of the ancient site of Volubilis (Morocco)*, (2011).