
Estimation de la porosité et de l'absorption d'eau des pierres à l'aide des essais non destructifs : cas de la calcarenite de Volubilis.

Issam Aalil^{1,2}, Kévin Beck¹, Xavier Brunetaud¹, Khalid Cherkaoui², Ali Chaaba², Muzahim Al-Mukhtar¹

IPRISME – Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci 45072 Orléans cedex 02, France – issam.aalil@univ-orleans.fr, kevin.beck@univ-orleans.fr, xavier.brunetaud@univ-orleans.fr, muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr

²ENSAM – Université Moulay Ismail, B.P. 15290 EL Mansour Meknès 50500 Maroc – cherkaouikhalid5@gmail.com, achaaba@hotmail.com

RÉSUMÉ. Volubilis est le site archéologique le plus préservé au Maroc. Il est inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1997. Sa principale pierre de construction est une calcarénite beige-jaunâtre, caractérisée par son hétérogénéité. Suite à des facteurs d'altération, certaines pierres sont dégradées et doivent être remplacées. Dans ce cadre, une étude a été menée pour établir des corrélations entre des propriétés de pierres calcarénite, nécessitant un prélèvement et des essais au laboratoire avec d'autres propriétés mesurables in situ par deux dispositifs non destructifs: le duromètre Piccolo et le tube de Karsten. Après un échantillonnage et un prélèvement de la carrière d'origine, des essais ont été effectués sur des échantillons de calcarénite au laboratoire : porosité, absorptions d'eau par immersion et par capillarité, dureté et absorption par tube de Karsten. D'après les résultats, l'essai de tube de Karsten donne une bonne estimation de l'absorption d'eau par immersion et par capillarité. De plus, cette étude a montré que la dureté est linéairement corrélée avec la porosité. Par conséquent, ces essais non destructifs pourraient être utilisés pour la sélection des pierres du remplacement adéquates au niveau de la carrière. Leur application sur le site Volubilis permettrait d'identifier leur état d'altération.

ABSTRACT. Volubilis is the largest archaeological site in Morocco. It has been registered on the UNESCO World Heritage list since 1997. Its main building stone is a beige-yellowish calcarenite limestone, characterized by its heterogeneity. For preservation purposes, this study investigated correlations between the properties of calcarenite stones measured in the laboratory and properties measured by two non-destructive devices: Piccolo hardness tester and Karsten tube. Tests were carried out on samples of calcarenite stone extracted from the main original quarry: porosity, water absorption by immersion, capillary water absorption, hardness and Karsten tube water absorption. The results showed that the Karsten tube test could be used to estimate water absorption by immersion and by capillarity. They also showed that porosity and hardness are linearly correlated. The two non-destructive tests could be then used to select the most appropriate blocks within the original quarry to replace deteriorated stones. Their application on site enables to identify stone alteration.

MOTS-CLÉS : tube de Karsten, restauration, dureté, calcarénite, corrélations, porosité.

KEY WORDS: Karsten tube, restoration, hardness, calcarenite stone, correlations, porosity.

1. Introduction

Volubilis est un site archéologique au Maroc, reconnu comme patrimoine mondial de l'UNESCO depuis décembre 1997. La pierre de construction principale de Volubilis est une calcarénite beige-jaunâtre. Elle représente environ 60% du volume total des pierres de construction. Elle a été extraite de la carrière Ain Schkor située à moins de 5 km du site [DES 08]. Cette pierre de construction se caractérise par son hétérogénéité et sa variabilité à la fois au niveau des monuments et de la carrière d'origine. Un projet majeur a été lancé en 2015 pour la préservation du site. La restauration de la pierre calcarénite nécessite un échantillonnage à l'échelle des monuments, qui doit être à la fois représentatif et aussi limité que possible afin de respecter le principe d'intervention minimale [ICO 03]. Dans cette étude, on cherche à établir des corrélations entre des propriétés mesurées à partir des essais destructifs nécessitant un prélèvement et un échantillonnage (porosité et coefficients d'absorption par immersion et par capillarité) et des propriétés obtenues à l'aide des essais non destructifs en utilisant le duromètre Piccolo et le tube de Karsten. Ces essais non destructifs seront utilisés pour distinguer les différents sous faciès de la pierre de calcarénite à l'échelle des monuments, identifier leurs altérations et rechercher les pierres de remplacement adéquates dans la carrière d'origine.

2. Matériaux et méthodes

Les essais ont été effectués sur des pierres calcarénite. C'est une pierre beige-jaunâtre constituée principalement de calcite et de quartz. 26 échantillons cubiques d'arrête 50 mm ont été découpés à partir des blocs extraits de la carrière d'origine. Au laboratoire, la porosité a été déterminée en utilisant la méthode de pesée hydrostatique. De plus, les essais d'absorption d'eau par immersion et d'absorption d'eau par capillarité ont été effectués respectivement selon les normes NF B 10-504 et NF EN 1925. Par ailleurs, des essais non destructifs de tube de Karsten et de dureté ont été réalisés sur les mêmes échantillons suivant les trois directions. Afin de comparer l'essai de tube de Karsten à la méthode standard d'absorption par capillarité, un coefficient d'absorption similaire C_k a été déterminé en négligeant la quantité d'eau absorbée avant 2 min. De même, le volume d'eau absorbé entre 2 min et 15 min (W15-2) a été déterminé. La dureté de Leeb HL des échantillons a été évaluée à l'aide d'un duromètre portable Piccolo, en effectuant 10 mesures en 10 points différents sur chaque paire de faces parallèles.

Au niveau du site Volubilis, des essais de dureté et de tube de Karsten ont été réalisés sur plusieurs pierres saines et altérées des murs d'une maison. Pour chaque pierre, 10 mesures de dureté et 3 mesures par tube de Karsten ont été effectuées.

3. Résultats et discussion

3.1. Propriétés de la calcarénite

Le tableau 1 résume les résultats des essais de porosité, de densités et d'absorption d'eau par immersion et par capillarité, réalisés sur trois sous faciès de la calcarénite. La porosité et la densité apparente montrent de grands intervalles de variation : 8,4 à 22,0 % et 2,38 à 2,07 g/cm³ respectivement. Cependant, les valeurs de densité du squelette solide, dépendant uniquement de la composition minéralogique, sont très proches. Elles sont du même ordre que celles des principaux minéraux constitutifs de la calcarénite: la calcite (2,71 g / cm³) et le quartz (2,65 g / cm³). De plus, les absorptions d'eau par immersion et par capillarité sont corrélées à la porosité : plus le sous faciès est poreux, plus son absorption est grande. En outre, l'essai d'absorption d'eau par capillarité montre une dépendance directionnelle témoignée par des indices d'anisotropie assez importants. Cette anisotropie est de plus en plus marquée pour les sous faciès moins poreux.

Tableau 1. Propriétés physiques de la pierre calcarénite.

Sous faciès	Beige	Intermédiaire	Jaunâtre
			
Nombre d'échantillons	10	8	8
Porosité (%)	8,4 ± 1,0	16,9 ± 2,0	22,0 ± 2,5
Densité apparente (g / cm ³)	2,38 ± 0,04	2,20 ± 0,05	2,07 ± 0,07
Densité du squelette solide (g / cm ³)	2,60 ± 0,03	2,65 ± 0,03	2,66 ± 0,02
Coef. d'absorption (%)	2,61 ± 0,35	5,73 ± 0,98	7,87 ± 1,62
Coef. de capillarité (kg/m ² .h ^{0.5})	0,592 ± 0,163	2,032 ± 0,528	3,716 ± 1,413
Indice d'anisotropie IA (%) *	42	35	24

$$*IA (\%) = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\min}$$

Par ailleurs, le tableau 2 présente les résultats de dureté et de coefficient d'absorption par tube de Karsten C_k pour les trois sous faciès de la pierre calcarénite. La dureté varie de 493 HL pour le sous faciès beige à 387 HL pour le sous faciès intermédiaire puis décroît à 324 HL pour le sous faciès jaunâtre. Elle montre un faible indice d'anisotropie de l'ordre de 13 %. Concernant le coefficient d'absorption par tube de Karsten C_k , il apparaît

corrélé avec la porosité des sous faciès, variant de $1,247 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$ à $8,684 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$, et il est fortement lié à la direction de mesure comme le témoignent les grandes valeurs d'indice d'anisotropie.

Tableau 2. Résultats de dureté et de coefficient d'absorption par le tube de Karsten de la calcarénite.

Sous faciès		Beige	Intermédiaire	Jaunâtre
Dureté (HL)	Moy $\pm$ Ecart type	493 $\pm$ 23	387 $\pm$ 33	324 $\pm$ 29
	Indice IA (%)	10	13	9
Coefficient d'absorption Ck ($\text{kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$)	Moy $\pm$ Ecart type	1,25 $\pm$ 0,44	3,54 $\pm$ 0,73	8,68 $\pm$ 4,30
	Indice IA (%)	53	48	29

3.2. Corrélations

D'après les résultats précédents, les deux essais non destructifs peuvent être utilisés pour différencier globalement les trois sous faciès de la calcarénite. Cependant, l'analyse précédente a été effectuée sur les valeurs moyennes de chaque sous faciès et non pas sur les propriétés des pierres elles-mêmes. Ainsi, dans cette partie on s'intéresse à l'étude des corrélations entre les propriétés des 26 échantillons des pierres testées.

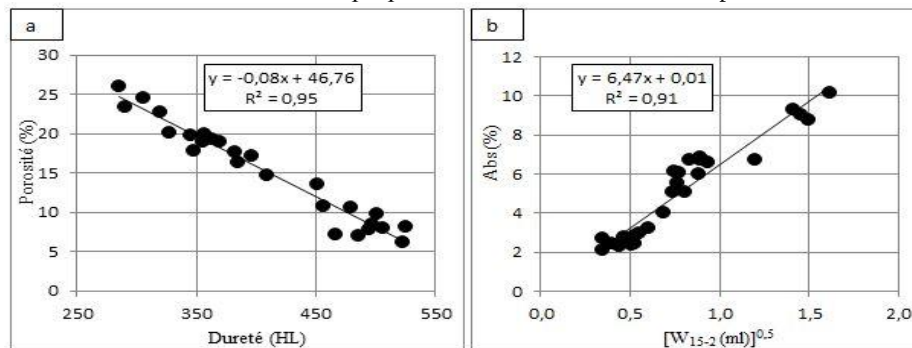


Figure 1. Corrélations entre la porosité-la dureté (à gauche) et entre la racine d'absorption par tube de Karsten et le coefficient d'absorption par immersion (à droite).

La figure 1a montre que la porosité et la dureté des pierres de calcarénite sont inversement proportionnelles. La variation de porosité en fonction de la dureté est linéaire avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,95$. De plus, à partir de la figure 1b, on voit que la racine carrée de la quantité d'eau absorbée par tube de Karsten entre 2 min et 15 min est bien corrélée linéairement au coefficient d'absorption d'eau par immersion. Par ailleurs, le coefficient d'absorption capillaire A peut-être en déduit du coefficient d'absorption par tube de Karsten Ck en utilisant la corrélation établie suivante :

$$A = 0,43 \text{ Ck avec } R^2 = 0,88 [1].$$

A partir de la relation ci-dessus, nous pouvons conclure que la quantité d'eau absorbée par unité de surface est plus élevée dans le cas de l'essai du tube de Karsten que pour l'essai d'absorption par capillarité standard. Ce constat est expliqué par l'effet l'adsorption supplémentaire des pores entourant la zone de contact entre le tube et la pierre, observée par radiographie [VAN 13].

3.3. Essais in situ

Des essais in situ ont été réalisés sur plusieurs pierres d'une maison au site Volubilis afin de voir jusqu'à quel niveau on peut extrapoler les résultats du laboratoire au site. La Figure 2 présente trois calcarénites parmi les pierres testées in situ. Les deux premières sont de sous faciès jaunâtres alors que la troisième est de type beige. Cependant une partie de cette dernière pierre apparait couverte d'une patine jaunâtre.

Le tableau 3 présente les résultats des essais de dureté et d'absorption par tube de Karsten pour les trois pierres testées. La valeur de dureté mesurée pour la première pierre indique qu'il s'agit effectivement d'une pierre de sous faciès jaunâtre. Sa porosité est estimée par la corrélation précédemment établie à 25 %. Le coefficient d'absorption par tube de Karsten Ck renvoie à un coefficient d'absorption capillaire de l'ordre de $2,435 \text{ kg/m}^2.\text{h}^{0.5}$ qui appartient à la plage entre les sous faciès jaunâtre et intermédiaire. Concernant la deuxième pierre, sa faible dureté lui affecte une porosité d'environ 28 %. Ainsi, son coefficient d'absorption capillaire

devrait dépasser $3,000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$, or il est de l'ordre de $0,336 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ selon son coefficient Ck en utilisant la corrélation préétablie [1]. Cette sous-estimation du coefficient d'absorption capillaire a été rencontrée pour des pierres situées sur des murs remontés avec des mortiers à base de terre et de terre-chaux. Ainsi suite à des précipitations, le lessivage des joints entraînerait un certain bouchage des pores. Par ailleurs, l'altération d'une partie de la troisième pierre affecte sa dureté en la faisant chuter de 457 HL à 327 HL. En se basant sur ces résultats, la porosité est estimée à 10,2 % pour la partie saine et à 20,6 % pour la partie affectée par la patine jaunâtre. Cette grande différence n'est pas attestée par les résultats d'absorption par tube de Karsten puisque les coefficients Ck obtenus restent dans la plage de sous faciès beige. D'après ces exemples, l'extrapolation des résultats du laboratoire au site doit se faire avec prudence en combinant plusieurs essais et en prenant en considération les facteurs pouvant fausser l'estimation des propriétés de pierres in situ notamment leur état d'altération.



Figure 2. Exemples de calcarénites testées in situ : pierre1, pierre2 et pierre 3.

Tableau 3. Résultats in situ de dureté et de coefficient d'absorption par le tube de Karsten pour trois pierres de la calcarénite au site Volubilis.

Propriétés	Pierre1	Pierre2	Pierre 3	
			Partie beige	Patine jaunâtre
Dureté (HL)	272 ± 57	229 ± 76	457 ± 59	327 ± 71
Coefficient Ck ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$)	$5,662 \pm 0,173$	$0,781 \pm 0,093$	$0,261 \pm 0,033$	$0,395 \pm 0,103$

4. Conclusion et perspectives

Cette étude avait pour objectif l'établissement des corrélations entre des propriétés de la calcarénite de Volubilis, dont la détermination nécessite un échantillonnage et un prélèvement, et des grandeurs mesurées par deux essais non destructifs : essai de dureté et essai d'absorption par tube de Karsten. Après un prélèvement au niveau de la carrière d'origine, les propriétés physiques des pierres de calcarénite telles que la porosité, le coefficient d'absorption d'eau sous immersion et le coefficient d'absorption d'eau par capillarité ont été déterminées au laboratoire. Ensuite, leur dureté et leur absorption d'eau ont été mesurées par deux dispositifs non destructifs : le duromètre Piccolo et le tube de Karsten. Par ailleurs, ces deux derniers essais ont été réalisés sur des pierres in situ. En termes de résultats, il est possible d'estimer l'absorption d'eau sous immersion et l'absorption capillaire des pierres de carrière à partir de l'essai de tube de Karsten. Cette étude a confirmé également que la porosité est bien corrélée à la dureté. Ainsi, ces deux dispositifs peuvent être utilisés au niveau de la carrière pour sélectionner les pierres du remplacement les plus adéquates. Néanmoins, l'utilisation des deux dispositifs sur des pierres du site doit être effectuée en prenant en compte les facteurs pouvant influencer les mesures, notamment l'état d'altération. Des travaux prochains seront consacrés à l'étude des corrélations entre l'absorption d'eau par tube de Karsten et la perméabilité d'eau et entre la dureté et la résistance mécanique.

5. Références

[DES 08] DESSANDIER D., et al., Atlas of the ornamental and building stones of Volubilis ancient site (Morocco), Final report BRGM/RP-55539-FR, 2008, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

[ICO 03] ICOMOS. Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, 2003, ISCARSAH.

[VAN 13] VANDEVOORDE, D. et al., «validation of in situ applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone», Procedia Chemistry, n° 8, 2013, p. 317-327.