

---

# Peut-on utiliser l'acquisition 3D pour décrire les dégradations de surface des constructions en pierre ?

**Romain Janvier<sup>1</sup>, Xavier Brunetaud<sup>2</sup>, Kévin Beck<sup>3</sup>, Sarah Janvier-Badosa<sup>4</sup>, Muzahim Al-Mukhtar<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : [romain.janvier@univ-orleans.fr](mailto:romain.janvier@univ-orleans.fr)

<sup>2</sup>Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : [xavier.brunetaud@univ-orleans.fr](mailto:xavier.brunetaud@univ-orleans.fr)

<sup>3</sup>Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : [kevin.beck@univ-orleans.fr](mailto:kevin.beck@univ-orleans.fr)

<sup>4</sup>Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : [sarah.janvier@univ-orleans.fr](mailto:sarah.janvier@univ-orleans.fr)

<sup>5</sup>Univ. Orléans, INSA-CVL, PRISME - EA4229, 8 rue Léonard de Vinci, F-45072, Orléans, France : [muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr](mailto:muzahim.al-mukhtar@univ-orleans.fr)

---

*RÉSUMÉ. Cet article propose d'étudier l'opportunité d'utiliser l'acquisition 3D en tant que technique non-destructive pour décrire de manière quantitative les faciès de dégradation des pierres d'un point de vue morphologique. Pour atteindre cet objectif, un échantillon cubique (8 cm de large) de tuffeau, une pierre calcaire siliceuse tendre et poreuse, a subi 10 cycles de vieillissement en laboratoire. Le vieillissement artificiel a consisté en cycles d'imbibition partielle (jusqu'à 2 cm) d'une solution saline ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) suivie d'un séchage à 105°C dans une étuve durant une semaine. Sa morphologie a ensuite été enregistrée à chaque cycle grâce à un scanner laser courte portée. La comparaison des modèles 3D a permis de calculer des cartes de distance qui permettent de décrire de manière quantitative les modifications volumiques de la surface de l'échantillon. La discussion concerne l'optimisation de la chaîne de traitement 3D, depuis l'acquisition laser jusqu'au calcul des cartes de distances, avec une attention spéciale portée à l'estimation des erreurs engendrées à chaque étape du processus, afin d'en déduire l'incertitude de mesure.*

*ABSTRACT. This paper proposes to investigate the opportunity of using 3D acquisition as non-destructive methodology to quantitatively describe stone degradation from the morphological point of view. To achieve this goal, a cubic porous limestone sample (8 cm thick) was subjected to 10 cycles of artificial ageing in laboratory. The artificial aging consisted in cycles of partial imbibition of salt solution ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) followed by drying at 105°C in an oven during one week. Morphology of the sample was monitored using a short range laser scanning. The comparison of 3D models obtained by laser scanning at different stages of artificial weathering allows the computation of distance map that quantitatively describes de volume changes at the end of each cycle resulting from salt weathering. The discussion focus on the optimization of the 3D processing pipeline, from laser scanning to distance map computation, with an emphasis on the quantification of errors generated at each step.*

*MOTS-CLÉS : Acquisition 3D, test non-destructif, altération des pierres, dégradation par les sels, scanner laser*

*KEY WORDS: 3D acquisition, non-destructive testing, stone degradation, salt weathering, laser scanning*

---

## 1. Introduction

L'acquisition 3D est désormais considérée comme une méthode fiable, précise et abordable dans le domaine de la conservation et de la valorisation du patrimoine. Ses premières applications ont été dans la création de « doubles virtuels » pour des besoins de conservations. Elle a été utilisée aussi bien pour de petits artefacts [SPR 14] [ORT 10] qu'à l'échelle des sites archéologiques entiers [LAM 07], avec pour objectif principal d'enregistrer l'état actuel d'un sujet dont la conservation est, ou pourrait devenir, problématique. Les technologies d'acquisition les plus couramment utilisées sont le scanner laser et la photogrammétrie. Si le scanner laser est considéré comme la technologie de référence pour les acquisitions 3D, la photogrammétrie peut maintenant être considérée comme une alternative viable en raison de développements majeurs dans son automatisation ces dix dernières années.

Des recherches récentes tendent à envisager de nouvelles utilisations de ces modèles 3D à des fins de gestion des restaurations et avec pour but de créer un système d'information 3D à l'échelle d'un monument [PED 13] [BRU 12] [STE 13] [FIO 11] [CAM 15]. Plus spécifiquement, le développement d'un « carnet de santé numérique » a pour but de mettre en place un outil polyvalent capable de représenter des données hétérogènes et de proposer des analyses statistiques fondées sur la corrélation spatiale de ces données. L'utilisation d'un modèle 3D réaliste permet la description d'architectures complexes, mais la principale valeur ajoutée d'un tel modèle est qu'il peut permettre de calculer des données quantitatives et des caractéristiques telles que le plan moyen, des cartes de normales, des cartes de profondeurs, des cartes de différences et même des rendus non réalistes tels que l'occlusion ambiante, etc.

Afin de peupler la base de données, un relevé *in situ* peut être réalisé. Par exemple, il peut consister en une série d'observations locales telles que des cartographies d'altérations de pierres. Ce relevé peut être rendu difficile à cause de la configuration du site et l'élévation de certains murs. De plus, un suivi d'ouvrage fondé sur la répétition et la comparaison des observations de terrain peut être trop coûteux en temps et en moyens humains. Travailler sur un modèle 3D très détaillé devrait constituer une alternative, ou à défaut une technique complémentaire, pour effectuer un tel relevé. Plus spécifiquement, il devrait à terme permettre d'extraire automatiquement les zones d'intérêt comme les zones altérées. L'applicabilité de cette méthode dépend bien sûr de la fidélité du modèle par rapport à l'existant. Des expérimentations dans ce sens, fondées sur des acquisitions 3D, ont tenté de décrire des changements morphologiques dus à l'altération des pierres [BIR 05] [LOP 10]. En dépit d'un concept prometteur, ils ont dû se limiter à une analyse statistique, car, étant dans l'impossibilité de recalculer les différentes acquisitions, ils n'ont pu comparer directement la surface altérée avec la surface originale. Ainsi, notre objectif est de tester la pertinence de l'acquisition au scanner laser dans le cas de l'identification des formes d'altérations, dans un environnement contrôlé, facilitant le recalage entre les différentes acquisitions.

## 2. Tests de vieillissements artificiels en laboratoire

### 2.1. Pierre étudiée : le Tuffeau

Le tuffeau est la principale pierre de construction des monuments historiques de la vallée de la Loire en France. C'est une pierre tendre et facile à travailler, qui permet donc la construction de bâtiments aux façades élégantes telles que le célèbre château de Chambord. Le tuffeau est une pierre calcaire sédimentaire blanc jaunâtre poreuse, très abondante dans le val de Loire. Son âge géologique correspond au Turonien moyen, il y a environ 90 millions d'années. Le tuffeau est un calcaire siliceux à grains fins contenant des minéraux argileux. Les principales phases cristallines sont : calcite, quartz, opale cristobalite-tridymite, glauconite, biotite, muscovite et smectite. Cette pierre est un matériau de construction très léger avec une densité apparente de 1,3 à l'état sec, une porosité totale d'environ 45% et une très large gamme de tailles de pores (de 0,003  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$  de diamètre d'accès aux pores). Avec cette porosité élevée, ce matériau de construction est une roche très tendre avec une résistance à la compression à l'état sec d'environ 10 MPa [DES 97] [BEC 03]. Cette pierre est également très sensible aux conditions environnementales et aux polluants, et elle est principalement dégradée par les desquamations, altérations se présentant sous deux formes: la desquamation en feuillets et la desquamation en plaques [JAN 14]. Pour cette étude, la roche a été extraite de la carrière d'Usseau en France.

### 2.2. Protocole de vieillissements artificiels

Pour l'étude de la durabilité des pierres au laboratoire, les tests de vieillissement artificiel basés sur l'altération causée par la cristallisation des sels solubles sont couramment utilisés [FLA 02] [VAN 07] [BEC 10a] [ANG 10]. Le test de vieillissement artificiel utilisé dans cette étude repose sur la norme de mesure de la résistance à la cristallisation des sels pour les pierres, qui utilise une solution de sulfate de sodium [STA 99]. Cependant, une

imbibition partielle a été réalisée sur les éprouvettes au lieu d'une immersion totale. En effet, l'imprégnation de la solution saline dans la pierre par une imbibition partielle permet une meilleure évaluation des changements morphologiques induits par les altérations grâce à la comparaison entre la partie polluée qui sera altérée et une partie non polluée qui peut être utilisée comme une référence. En outre, une imbibition partielle avec une hauteur capillaire de 2 cm reflète un processus plus réaliste pour la dégradation car l'altération des pierres de monuments affecte principalement la surface de la pierre [BEC 10b].

Dans cet essai, un échantillon cubique ( $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$ ) de tuffeau a été soumis à 10 cycles d'imbibition-séchage en utilisant la solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  à 14% en poids. Chaque cycle comprend les étapes suivantes :

- Imbibition partielle avec la solution saline de sulfate de sodium à 20 °C. L'imbibition est arrêtée lorsque la hauteur capillaire atteint 2 cm.

- 7 jours de séchage à 105 °C dans une étuve. Le séchage est complet à la fin de chaque cycle.

- 2 heures de refroidissement à la température ambiante (20 °C, 40–50% HR) avant la prochaine imbibition.

A la fin de chaque cycle, l'aspect visuel a été enregistré par des photographies afin d'évaluer le niveau de dégradation de l'échantillon de pierre, et la surface a été numérisée par scanner laser.

### 3. Acquisition 3D

#### 3.1. Scanner laser

Un scanner laser par triangulation de type Konica Minolta VI-910 a été utilisé. Ce scanner est constitué d'une source émettant un faisceau laser et d'un capteur CCD VGA (640x480 pixels). Lors du processus d'acquisition, le faisceau laser est déplacé sur la surface de l'objet mesuré par un miroir de déflexion. A chaque déplacement, la position du faisceau sur la surface de l'objet est enregistrée par le CCD. Par la connaissance *a priori* de l'angle entre la source et le CCD ainsi que leur distance, ce procédé permet la création d'une carte de profondeur, une image pour laquelle la valeur de chaque pixel encode la distance à l'objet. Tous ces pixels sont triangulés en 2D, dans l'espace image, puis projetés en 3D pour générer un nuage de points 3D associé à des données topologiques, c'est-à-dire un maillage. Dans notre montage expérimental nous avons équipé le scanner avec un objectif 14 mm. Dans cette configuration, les données constructeur spécifient une justesse de  $\pm 0,38 \text{ mm}$  en X, de  $\pm 0,31 \text{ mm}$  en Y, et de  $\pm 0,20 \text{ mm}$  en Z (profondeur), pour une fidélité de  $\pm 16 \mu\text{m}$  en travaillant dans le mode *high accuracy* à 0,6 m de distance.

Étant donné qu'il est impossible de numériser un cube entier en un seul scan, nous avons choisi de procéder en 4 numérisations successives. Les différents points de vue, espacés d'un pas angulaire de 90°, sont obtenus grâce à une table tournante sur laquelle est placé l'échantillon. La face de l'échantillon en contact avec le plateau tournant est la face non soumise à l'imbibition. Afin de minimiser le nombre de scans, et maximiser le recouvrement entre les acquisitions (nécessaire au recalage), nous avons essayé d'éviter un positionnement purement parallèle du capteur par rapport à une face de l'échantillon. A la place, le scanner est positionné en surplomb par rapport à l'échantillon, de manière à réaliser l'acquisition de trois faces simultanément : deux latérales, et celle du dessus, soumise à l'imbibition. Le logiciel du constructeur *Polygon Editing Tool* est ensuite utilisé pour exporter les données dans un format « ouvert », pour leur traitement.

#### 3.2. Post-traitement

A la suite de l'acquisition 3D, chaque scan est dans son propre repère local. Le recalage des quatre scans d'un même cycle est réalisé en sélectionnant manuellement 6 points communs entre chaque paire de scans présentant du recouvrement (tout en sachant que seuls 3 points sont nécessaires pour calculer une transformation rigide). Cet alignement manuel est ensuite affiné par *Iterative Closest Point* – ICP [BES 92]. Il en résulte un fichier contenant la concaténation de quatre maillages disjoints et alignés, avec une forte redondance des informations au niveau des zones de recouvrement. Afin de créer une seule surface à partir de ces données, nous avons utilisé *Screened Poisson Surface Reconstruction* – PSR [KAZ 13]. Cet algorithme est connu pour être robuste au bruit et fournir une excellente interpolation permettant de combler les petits trous dans la surface pouvant résulter d'un manque d'information. En contrepartie il tend à vouloir créer une surface totalement fermée et donc créer des surfaces aberrantes en bordure de maillage. Il est donc nécessaire d'opérer une courte étape de nettoyage manuel.

Après la reconstruction de la surface, les différentes acquisitions correspondantes à chaque cycle sont également recalées entre elles par sélection manuelle de points communs, et suivie d'un affinage par ICP. Ce recalage est réalisé de manière incrémentale, chaque cycle étant recalé seulement avec le cycle le précédant, car deux cycles consécutifs sont plus à même de partager des informations communes. Une fois ce recalage effectué,

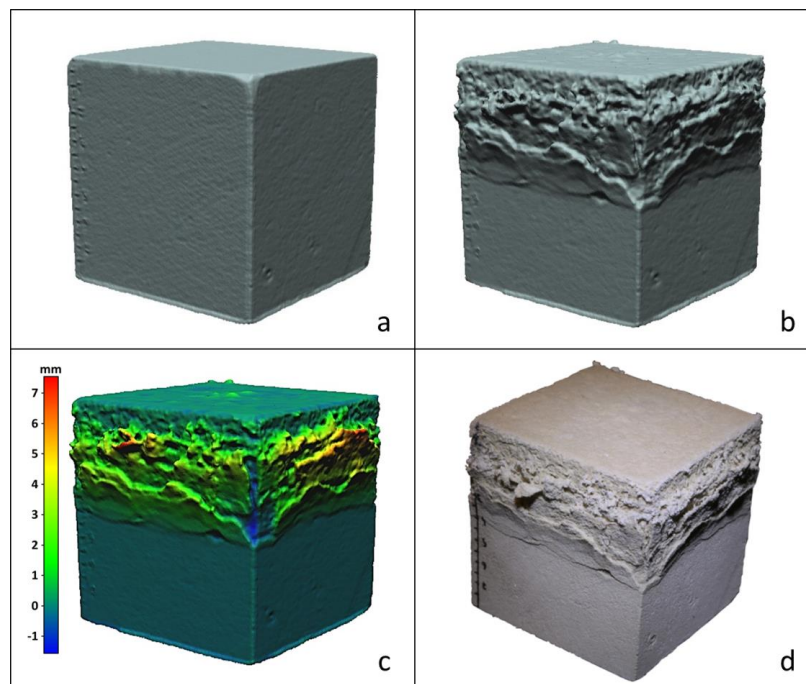
une carte de différences entre deux acquisitions peut être calculée. Elle est formulée comme étant la distance entre un point d'un nuage donné et son plus proche triangle dans le maillage surfacique de référence. Le modèle issu de la première acquisition avant le premier cycle, c'est-à-dire le modèle correspondant à l'état non altéré, a été choisi comme référence. Cette carte de différences a été calculée pour chaque cycle et convertie en fausses couleurs puis projetée sur chacun des maillages afin d'augmenter la visualisation par la quantification des changements morphologiques. Toutes ces opérations de traitement des données ont été réalisées avec le logiciel *Open Source CloudCompare* [CLO 15].

#### 4. Résultats et discussions

Afin de présenter les résultats de cette étude, nous avons choisi de l'illustrer par le premier maillage correspondant à l'état initial non altéré (figure 1.a.), le maillage de l'échantillon après 10 cycles (figure 1.b), le même maillage coloré avec les informations de distance (figure 1.c), et pour une comparaison visuelle, une photographie de la pierre après 10 cycles, d'un point de vue quasi-similaire (figure 1.d).

Dans les études précédentes [BIR 05] [LOP 10] des zones dégradées sont comparées à d'autres zones non altérées, en se fondant sur le calcul de caractéristiques morphologiques. Dans ce cas de figure, il est alors difficile de dissocier l'influence de l'altération dans le changement morphologique de celle des variations naturelles qui pourraient survenir au niveau de la surface de la pierre saine. Par rapport à ces études, nous pouvons ici comparer directement la zone dégradée avec l'état sain initial grâce au processus de recalage. Ainsi, les cartes de différences produites traduisent directement l'évolution de la morphologie induite par l'altération.

Le résultat principal est que ce protocole de numérisation peut permettre de détecter des changements morphologiques induits par la cristallisation de sels à la surface de l'échantillon. L'utilisation des fausses couleurs permet l'évaluation locale de l'amplitude des changements. Par exemple ici jusqu'à 7 mm pour les desquamations en feuillets les plus marquées. A l'inverse, des zones dans un coin de l'échantillon apparaissent en bleu, ce qui traduit un changement négatif de faible amplitude : cela correspond donc à une perte de matière durant le test de vieillissement.



**Figure 1.** (a) *Modèle 3D de l'état initial non altéré* ; (b) *Modèle 3D après 10 cycles* ; (c) *Modèle 3D après 10 cycles, avec les informations de distance (mm)* ; (d) *Photographie de la pierre après 10 cycles.*

L'échantillon de tuffeau présente des efflorescences salines combinées avec des desquamations en feuillets, et toutes les surfaces altérées sont pulvérulentes. La couleur des surfaces pulvérulentes est légèrement jaunâtre par rapport aux surfaces saines, et les efflorescences salines sont légèrement blanchâtres par rapport aux zones

pulvérulentes. Néanmoins, la variation des couleurs reste très légère et ne peut d'ailleurs pas être vue dans la figure 1.d. Les efflorescences salines sont caractérisées par un dépôt blanc de sels, alors que la desquamation en feuillets génère des ouvertures millimétriques. Les deux formes de dégradation contribuent au changement morphologique de l'échantillon et aucun protocole fondé sur une quantification morphologique n'est capable de les distinguer à cette échelle. De plus, comme le scanner laser peut seulement mesurer la surface de l'échantillon, il peut « voir » le détachement d'un feuillet mais est incapable de mesurer précisément la taille de l'ouverture sous ce feuillet.

D'un point de vue métrologique, deux étapes de post-traitement peuvent induire une incertitude qui s'additionne à celle inhérente au scanner : le recalage, et la reconstruction de la surface. L'algorithme ICP utilisé pour optimiser le placement de paires de scans utilise une formulation locale et peut donc être piégé dans un optimum local. De plus, dans certains cas, l'optimum global ne correspond pas à la solution idéale. Plus spécifiquement pour les échantillons sains ainsi que les acquisitions des premiers cycles de vieillissement, les surfaces sont plutôt régulières et sans caractéristiques, et introduisent ainsi de fortes ambiguïtés entre les différentes faces. Dans ce cas, le processus de recalage requiert une initialisation minutieuse par sélection manuelle de points communs ainsi qu'un choix attentif des paramètres de l'ICP. Cela rend donc l'opération fastidieuse et potentiellement source d'erreurs. De même, lors du recalage inter-cycle, les différences morphologiques entre deux modèles peuvent être une source d'erreur : l'ICP qui va chercher à faire correspondre des points dans des zones pourtant potentiellement différentes. L'algorithme de reconstruction (PSR) de surface créé un nouvel ensemble de points qui interpole le nuage de points initial ; ainsi, même s'il a l'avantage de fusionner les informations redondantes, il peut avoir tendance à lisser les arêtes vives.

Pour estimer l'influence globale du post-traitement sur l'intégrité des données, nous avons comparé, pour chaque échantillon, le maillage final (obtenu par PSR) avec chacun des maillages originaux obtenus directement par le scanner laser. Chacun des 4 scans d'un cycle a été aligné indépendamment avec le maillage final par sélection manuelle de points communs suivi d'ICP. Puis pour chacun de ces scans une carte de distance avec le maillage final a été calculée. Le résultat montre que l'écart type est de l'ordre de 0,1 mm. Cette valeur est considérée comme valable étant donné qu'elle est inférieure à la justesse, mais elle demeure cependant supérieure à la fidélité. En conséquence, ce protocole d'acquisition morphologique fondé sur le scanner laser courte portée peut être jugé comme pertinent pour évaluer les changements morphologiques induits par une altération par le sel, si et seulement si ces changements sont de l'ordre de 0,1 mm.

## 5. Conclusion

Ce papier propose d'évaluer la pertinence de l'acquisition 3D par scanner laser dans le cadre de la description morphologique de l'altération des pierres. Dans le protocole présenté, l'altération est induite par un processus incrémental de cycles de vieillissement artificiel, consistant en une imbibition partielle d'un échantillon de tuffeau de 8x8x8 cm dans une solution de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  suivi d'un séchage complet. Après 10 cycles, l'échantillon de pierre présente des surfaces pulvérulentes accompagnées d'efflorescences salines combinées avec des desquamations en feuillets.

Le protocole d'acquisition consiste en 4 scans lasers consécutifs recalés par sélection manuelle de paires de points communs, suivie par un affinage du positionnement par ICP. La reconstruction de la surface a été obtenue par PSR. Les différents cycles ont été comparés, après leur recalage dans le même repère, par le calcul d'une carte de distance. Le résultat peut être présenté comme un maillage coloré par la carte de différence. Ceci permet d'augmenter la visualisation par la quantification des changements morphologiques tout le long du vieillissement de l'échantillon.

La principale source d'erreur de notre protocole est introduite au moment du post-traitement, par des recalages manuels des surfaces des nuages et une reconstruction de la surface. Néanmoins, l'évaluation globale de l'incertitude additionnelle nous a permis de conclure que l'erreur introduite était plus faible que la justesse du scanner. Bien qu'elle soit également plus élevée que la fidélité issue des spécifications du scanner, nous pouvons la considérer comme étant acceptable pour notre application. Une option pour minimiser une partie de ces erreurs serait de contraindre et de pondérer l'ICP en réduisant le poids des informations situées dans les zones altérées de l'échantillon. Dans ce but, une segmentation préalable de chaque modèle est nécessaire ; elle pourrait être permise en calculant des informations telles que l'occlusion ambiante, la courbure ou la rugosité.

Pour améliorer la caractérisation des altérations, il conviendrait de disposer, en plus de l'information géométrique, d'une information colorimétrique calibrée et de bonne qualité. Sur ce point, la photogrammétrie

proposer une véritable plus-value au scanner laser. Elle est moins onéreuse, et est surtout capable d'obtenir une information colorée bien plus précise et contrôlable avec cette méthode. De plus elle a le potentiel pour s'affranchir des étapes de recalage manuel. Toutefois, la précision géométrique de la photogrammétrie ne dépend pas seulement des spécifications de l'équipement (camera, objectifs), mais aussi du protocole d'acquisition (éclairage, algorithmes utilisés), et surtout du matériau étudié. En effet, si le matériau est très peu texturé, le modèle résultant peut être bruité et peu précis. Néanmoins, l'opportunité d'utiliser une telle méthode doit être saisie pour étudier sa pertinence.

## 6. Bibliographie

- [ANG 10] ANGELI M., HÉBERT R., MENÉNDEZ B., DAVID C., BIGAS J.-P., « Influence of temperature and salt concentration on the salt weathering of a sedimentary stone with sodium sulphate », *Engineering Geology*, n°115, 2010, p. 193-199.
- [BEC 03] BECK K., AL-MUKHTAR M., ROZENBAUM O., RAUTUREAU M., « Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau: building material in the Loire Valley-France », *Building and Environment*, n°38, 2003, p. 1151-1162.
- [BEC 10a] BECK K. and AL-MUKHTAR M., « Evaluation of the compatibility of building limestones from salt crystallization experiments », *Geological Society of London*, n°SP-333, 2010a, p. 111-118.
- [BEC 10b] BECK K. and AL-MUKHTAR M., « Weathering effects in an urban environment: a case study of a French porous limestone », *Geological Society of London*, n°SP-331, 2010b, p. 103-111.
- [BES 92] BESL P.J., and MCKAY N.D., « A Method for Registration of 3-D Shapes », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, n°2, 1992, p. 239-56.
- [BIR 05] BIRGINIE J.M., RIVAS T., « Use of a laser camera scanner to highlight the surface degradation of stone samples subjected to artificial weathering », *Building and Environment*, vol. 40, n°8, 2005, p. 1011-1020.
- [BRU 12] BRUNETAUD X., De LUCA L., JANVIER-BADOSA S., BECK K., AL-MUKHTAR M., « Application of digital techniques in monument preservation », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16, n°5, 2012, p. 543-556.
- [CAM 15] CAMPANARO D.M., LANDESCI G., DELL'UNTO N., LEANDER TOUATI A.M., 2015, « 3D GIS for cultural heritage restoration: A 'white box' workflow », *Journal of Cultural Heritage*, doi:10.1016/j.culher.2015.09.006.
- [CLO 15] CLOUDCOMPARE (version 2.6.2) [GPL software]. EDF R&D, Telecom ParisTech, 2015. Retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>
- [DES 97] DESSANDIER D., ANTONELLI F., RASPLUS L., « Relationships between mineralogy and porous medium of the crai tuffeau », *Bulletin de la Soc. Géologique de France*, n°186/6, 1997, p. 741-749.
- [FIO 11] FIORINI A., URCIA A., ARCHETTI V., « The digital 3D survey as standard documentation of the archaeological stratigraphy », in *The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*, 18th-21st October 2011, Prato, Italy.
- [FLA 02] FLATT R.J., « Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated », *Journal of Crystal Growth*, n°242, 2002, p. 435-454.
- [JAN 14] JANVIER-BADOSA S., BECK, K., BRUNETAUD X., AL-MUKHTAR M., « The occurrence of gypsum in the scaling of stones at the Castle of Chambord (France) », *Environmental Earth Sciences*, vol. 71, n°11, 2014, p. 4751-4759.
- [KAZ 13] KAZHDAN M. and HOPPE H., « Screened Poisson Surface Reconstruction », *ACM Transactions on Graphics*, vol. 32, n°3, 2013. p. 1-12.
- [LAM 07] LAMBERS, K., EISENBEISS, H., SAUERBIER, M., KUPFERSCHMIDT, D., GAISECKER, T., SOTOODEH, S., HANUSCH, T., « Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru », *Journal of Archaeological Science*, vol. 34, n°10, 2007, p. 1702-1712.
- [LOP 10] LÓPEZ-ARCE P., VARAS-MURIEL M.J., FERNÁNDEZ-REVUELTA B., ÁLVAREZ DE BUERGO M., FORT R., PÉREZ-SOBA C., « Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification », *CATENA*, vol. 83, n°2-3, 2010, p. 170-185.

- [ORT 10] ORTIZ SANZ J., DE LA LUZ GIL DOCAMPO M., RODRÍGUEZ S.M., REGO SANMARTÍN M.T., CAMESELLE G.M., « A simple methodology for recording petroglyphs using low-cost digital image correlation photogrammetry and consumer-grade digital cameras », *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, n°12, 2010, p. 3158-3169.
- [PED 13] PEDELÌ C., « An interdisciplinary conservation module for condition survey on cultural heritages with a 3D information system, international archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences », in *XXIV International CIPA Symposium*, 2–6 September 2013, Strasbourg, France, vol. XL-5/W2.
- [SPR 14] SPRING A. P., PETERS C., « Developing a low cost 3D imaging solution for inscribed stone surface analysis », *Journal of Archaeological Science*, n°52, 2014, p. 97-107.
- [STA 99] EN 12370 *Standard, Natural stone test methods – determination of resistance to salt crystallization*, 1999.
- [STE 13] STEFANI C., JANVIER-BADOSA S., BECK K., DE LUCA L., BRUNETAUD X., AL-MUKHTAR M., « Developing a toolkit for mapping and displaying stone alteration on a web-based documentation platform », *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, n°1, 2013, p. 1-9.
- [VAN 07] VAN T. T., BECK K., AL-MUKHTAR M., « Accelerated weathering tests on two highly porous limestones », *Environmental Geology*, n°52, 2007, p. 283-292.