

---

# Diagnostic, morphologies et mécanismes d'altération des pierres de construction du parc bâti de l'algérois

**N. Touloum, A. Brara**

*CNERIB, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment  
Cité Nouvelle El-Mokrani, Souidania, Alger.*

[touloumcnerib@yahoo.fr](mailto:touloumcnerib@yahoo.fr)

---

*RESUME. Cet article traite de l'identification des agents et des mécanismes qui sont à l'origine des morphologies d'altération des pierres mises en œuvre dans des ouvrages bâtis de l'algérois datant du 19<sup>e</sup> siècle. Pour ce faire, une palette de moyens d'investigation et de méthodes pétro-physiques sur des échantillons prélevés à partir d'un édifice, représentatif du patrimoine urbain bâti, est mise en œuvre. Un état sanitaire effectué in-situ a permis de caractériser de visu plusieurs morphologies d'altération. Les essais d'identification et de caractérisation réalisés sur les échantillons ex-situ ont permis de révéler que les principaux mécanismes mis en jeu sont de nature chimique, physico-chimique et biologique. Les agents impliqués dans ces mécanismes sont des sels transportés par l'eau en tant que vecteur, et des organismes vivants tels que les algues, lichens et champignons.*

*ABSTRACT. The aim of this work is to identify agents and mechanisms, which are at the origin of the stones damages of buildings constructed in the 19<sup>th</sup> century in Algiers. For this goal, a range of investigative and petro-physical methods is used to identify and characterize stone samples extracted from the most representative building of this urban patrimony. A visual investigation conducted in-situ has identified several damages. The various tests for the identification and characterization carried out in the laboratory revealed that the main mechanisms involved are of chemical, physico-chemical and biological origin. The agents implicated in these mechanisms are salts transported by water as a vector, and living organisms such as algae, lichens and mushrooms.*

*MOTS-CLES : patrimoine, pierre, pétro-physique, altérations, sels, mécanismes, agents.*

*KEYWORDS: heritage, stone, petro-physical, alterations, salts, mechanisms, agents.*

---

## 1. Introduction

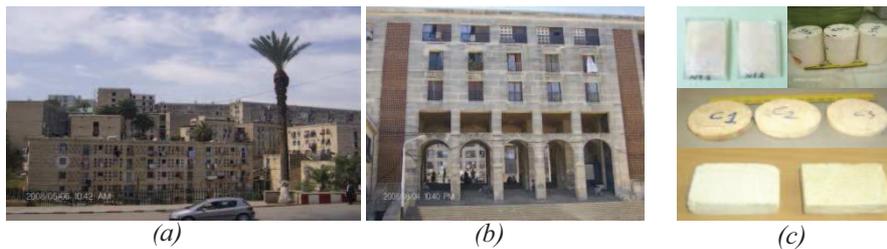
D'innombrables sites historiques mondiaux datant de plusieurs époques allant de l'ère antique jusqu'à la période contemporaine se caractérisent par des constructions en pierres. Toutefois, ce matériau issu de la roche subit des altérations dans le temps. Afin d'accroître la durabilité de ces sites historiques, ils doivent faire nécessairement l'objet d'action de préservation et de restauration. À cet égard, l'identification des agents et des mécanismes qui sont à l'origine des altérations de la pierre revêt un intérêt considérable pour réhabiliter, conserver et restaurer le patrimoine historique.

Les pierres de constructions sont généralement soumises à des conditions environnementales plus contrastées, changeant à un rythme plus soutenu que leur milieu géologique. Les travaux expérimentaux existants à l'échelle mondiale, révèlent une bonne corrélation entre les propriétés pétro-physiques de ce matériau et des morphologies d'altération l'affectant (Jeannette, 1995). Il en est de même pour l'influence de facteurs environnementaux sur les altérations. Quant aux travaux de recherche effectués en Algérie, les données expérimentales de terrains sont éparpillées, voire inexistantes. Pourtant, l'Algérie dispose d'un important patrimoine bâti dont la construction remonte à l'époque antique. Plusieurs villes, aujourd'hui, gardent des traces des anciennes cités puniques, numides et romaines. Parmi les vestiges de grande renommée, le tombeau royal Medghassen, considéré comme le plus ancien mausolée numide d'Afrique du Nord (Blas, 2003). D'autres sites antiques demeurent intacts et témoignent de la perfection urbanistique des cités romaines telles que Timgad, Tipaza et Djemila etc. (Blas, 2003). Par ailleurs, la ville d'Alger compte un important parc immobilier en pierre naturelle, datant du 19<sup>e</sup> siècle. Ce parc constitué de plusieurs cités, conçu par l'architecte de renom *Pouillon* est érigé quasiment durant l'époque coloniale. Des quartiers entiers comportant des habitations et des sièges d'administrations de trois à vingt niveaux, sont bâtis intégralement en utilisant un seul type de pierre de construction (provenance de Marseille) tels que Diar-Saada, Diar-El-Mahçoul, Climat de France, etc. Cet important patrimoine a subi avec le temps d'importantes altérations, visibles à l'œil nu. Notamment au niveau de la pierre avec des pertes de matière, des colonisations biologiques, des décolorations et des dépôts, tel que définies par le glossaire d'Icomos-Isos (Icomos, 2007), susceptibles de mettre en péril à terme la stabilité de ces ouvrages. Cette contribution a pour objectif l'identification des agents et des mécanismes qui sont à l'origine des morphologies d'altérations de ces pierres en œuvre.

Dans cet article, le site d'investigation, l'ouvrage de l'étude et corps d'épreuves, associés aux moyens et méthodes d'essais, sont succinctement décrits. Par la suite, les résultats obtenus de l'identification physico-chimiques, mécanique, la caractérisation pétro-physique et de l'étude de l'évolution des propriétés du matériau sont présentés et analysés. Cette analyse est suivie de la mise en évidence des corrélations existantes entre les résultats obtenus et les morphologies d'altération relevées. En guise de conclusion, il est mis en lumière les agents et les mécanismes qui sont à l'origine des détériorations observées.

## 2. Site d'investigation, corps d'épreuves et conditionnement

Le site d'investigation retenu est la cité de Diar-El-Mahçoul, comprenant 1 550 logements, bâtie sur une superficie de 12 ha, photo 1(a). Le choix de ce site est dicté par son état d'altération le plus avancé, eu égard à sa localisation. En effet, cette cité est située sur les hauteurs d'Alger et le plus près de la côte méditerranéenne. De ce site, le bâtiment le plus altéré est considéré comme échantillon de l'étude, photo 1(b), à partir duquel des corps d'épreuves (carottes, croûtes et poudres) sont extraits, photo 1(c). Pour l'identification pétrographique et physico-chimique, des lames minces et des poudres de granulométrie inférieure à  $60\ \mu\text{m}$  sont examinées. Par ailleurs, les épreuves de caractérisation du milieu de stockage, de transport de l'eau et de comportement mécanique sont effectuées sur des carottes à  $50 \times 50\ \text{mm}^2$ . Pour l'étude de transfert de la vapeur d'eau, les essais sont réalisés sur des disques à  $50 \times 15\ \text{mm}^2$  et des parallélépipèdes de  $50 \times 10 \times 10\ \text{mm}^3$ . Pour chaque épreuve, trois éprouvettes sont testées. Ces dernières sont nettoyées à l'air comprimé et référencées, leurs dimensions sont relevées. Ensuite, elles sont séchées à l'étuve à  $(65 \pm 5\ ^\circ\text{C})$  jusqu'à obtention de masse constante. La campagne d'essais est réalisée dans des conditions de laboratoire  $(20 \pm 5\ ^\circ\text{C})$ .



**Photo 1.** (a) : site de Diar-El-Mahçoul, (b) : ouvrage investigué, (c) : corps d'épreuves

## 3. Matériels et méthodes d'essais

Pour l'expérimentation, une palette des moyens d'investigations est utilisée, à savoir un diffractomètre des rayons X, un microscope électronique à balayage, la fluorescence X et un vidéo-microscope. Les essais mécaniques destructifs sont réalisés à l'aide d'une machine type *Controls* de capacité maximale 500 kN. Pour parvenir à une analyse la plus complète possible des altérations, une panoplie d'essais physico-chimiques, pétro-physiques et mécaniques est réalisée. Les méthodes choisies dans cette expérimentation sont les procédures d'essais pratiquées au Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques de Paris (LRMH, 2007). La campagne d'essais est enclenchée par une identification pétrographique et une caractérisation physico-chimique et mécanique de la roche. Ensuite, la détermination des propriétés de stockage (porosité) et de transfert des fluides (capillarité,

évaporation) est abordée (Dessandier, 2000). Des tests de perméabilité à la vapeur et des isothermes d'adsorption des molécules d'eau sont réalisés. L'investigation est complétée par la mise en œuvre d'un essai de vieillissement accéléré (Arnold, 1995). Ce test a pour objectif principal de mettre en évidence l'action agressive des sels sur le développement et l'intensité des morphologies d'altération observées.

La détermination de la porosité totale de la pierre est effectuée en régime monophasique (sous vide). Cependant, la porosité à 48 heures est évaluée en régime biphasique (eau + air) en utilisant la méthode d'Hirshwald. La caractérisation du transfert capillaire sur trois corps d'épreuve notés C1, C2 et C3 a fait appel, d'une part, au suivi de la prise de masse en eau absorbée, d'autre part, à des mesures du front d'eau déplacée sur les éprouvettes. Ces mesures sont effectuées à des intervalles de temps croissants. Quant au test d'évaporation d'eau, il est réalisé en fin d'essai de porosité totale dans des conditions saturées. Les trois corps d'épreuve désignés par P1, P2 et P3 sont emballés dans des sacs en néoprène de manière à laisser la face supérieure en contact avec le milieu ambiant (22 % d'humidité relative, désignée dans la suite du texte par HR) et l'étanchéité est renforcée par un ruban en téflon. Des pesées sont alors effectuées régulièrement jusqu'à obtention de la masse constante des éprouvettes. Le degré de saturation critique  $S_c$ , qui est le point témoignant de la déconnexion hydraulique, est alors déterminé. Concernant l'expérience de perméabilité à la vapeur d'eau, le protocole adopté vise, en premier lieu, le suivi du transfert de la vapeur d'eau dans des conditions non saturées, en second lieu, la mesure de variation de masse en régime permanent. Pour ce faire, une coupelle contenant de l'eau (HR = 100 %) surmontée en guise de fermeture par les trois corps d'épreuves dénommés X1, X2 et X3 est placée dans une ambiance à humidité relative de 33 % et à  $(25 \pm 5^\circ\text{C})$  de température. Parallèlement, un test d'isothermes d'adsorption est entrepris. Il consiste à mettre les trois éprouvettes désignées par I1, I2 et I3 dans des bocaux fermés hermétiquement contenant des solutions salines sursaturées. Ces solutions sursaturées, conçues par plusieurs sels, permettent de fixer différentes humidités relatives. Les bocaux sont au nombre de 5 et les gammes d'humidités relatives sont de 22 %, 33 %, de 43 à 44 %, 57.6 % et 68.9 %. Les éprouvettes sont pesées régulièrement jusqu'à obtention d'une masse constante. Ceci permet d'obtenir des courbes de la cinétique de prise de masse de la pierre pour chaque humidité relative donc l'isotherme d'adsorption, (Rousset, 1991).

Enfin, un vieillissement accéléré par cristallisation/dissolution de sels est amorcé, pour un nombre  $i$  de cycles d'imprégnation, dans une solution de mirabilite ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}$ ) et de séchage. Pour identifier l'évolution de la dégradation avec le nombre de cycles accomplis, les essais sont réalisés avec trois niveaux  $N$  de nombre de cycles (4, 5 et 6 cycles). Pour chaque série d'essais, trois éprouvettes sont testées. Après chaque cycle, la masse sèche des corps d'épreuve est mesurée.

## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Nature du matériau et propriétés de stockage

Les analyses d'identification de la pierre par diffractométrie X, fluorescence X et par microscope électronique à balayage, ont dévoilé une roche tendre de nature calcaire bioclastique, avec une teneur importante en calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) à 98 % et de traces du quartz à 2 % environ. Des minéraux argileux accompagnés de traces de phosphore et de soufre sont également présents.

Pour ce qui est de la caractérisation des propriétés de stockage des fluides de la pierre étudiée, il convient de rappeler que la porosité totale à l'eau est définie comme la porosité accessible à l'eau sous vide. Sa valeur correspond au rapport du volume des vides d'un échantillon sur son volume total, notée  $N_t$  (%). Toutefois, la porosité à 48 heures ( $N_{48}$ ) est une mesure permettant d'apprécier la porosité dans les conditions d'immersion naturelle. La différence ( $N_t - N_{48}$ ) est souvent assimilée à la porosité piégée  $N_p$  qui fait référence à l'espace poreux qui reste occupé par le fluide le moins mouillant lors d'une imbibition capillaire. L'expérimentation a mis en évidence une porosité accessible à l'eau (totale)  $N_t$  égale à 12.90 % et une porosité piégée  $N_p$  égale à 3.71 % qui a pour corollaire a priori une circulation facile des fluides dans le réseau poreux.

### 4.2. Propriétés de transfert d'eau

#### 4.2.1. Imbibition capillaire et évaporation

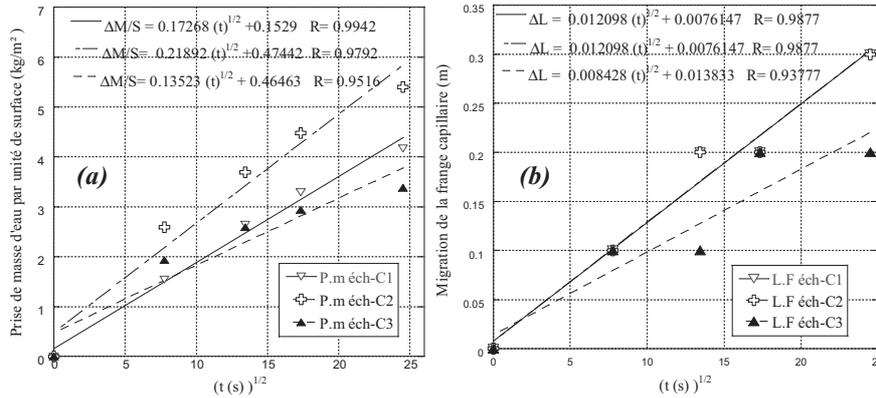
Le phénomène d'imbibition capillaire se traduit par une migration de la zone mouillée ou frange capillaire et par une prise de masse des éprouvettes. Les résultats trouvés pour la pierre étudiée sont représentés par la figure 1(a-b). Les vitesses d'imbibitions sont calculées en procédant à une régression linéaire sur un nombre  $n$  de points selon les relations [1] et [2] ci-après. avec  $\Delta M/S$  la prise de masse des éprouvettes (C1, C2 et C3) par la surface réelle du contact,  $\Delta L$  est la migration de la frange capillaire et  $t$  est le temps.

$$\frac{\Delta M}{S} = A \cdot \sqrt{t} + b \quad [1]$$

$$\Delta L = B \cdot \sqrt{t} + c \quad [2]$$

Les valeurs des vitesses obtenues pour les trois éprouvettes sont de 0.172, 0.219, 0.135 pour A avec un coefficient de corrélation R supérieur à 0.95, et de 0.012, 0.012, 0.0084 pour B avec un coefficient de régression R supérieur à 0.93.

La valeur moyenne de  $A = 0.17 \text{ kg. m}^{-2}/\text{s}^{1/2}$  et celle de  $B = 0.01 \text{ m/ s}^{1/2}$ . Ces valeurs moyennes obtenues correspondent dans la littérature à celles des calcaires tendres.



**Figure 1.** Cinétique d'imbibition d'eau par capillarité ;(a) : prise de masse d'eau par unité de surface ; (b) : migration de la frange capillaire en fonction du temps

Lors du séchage (par évaporation), trois stades sont observés, figure 2(a). Une valeur critique  $S_c$  caractérisant le changement de régime entre le séchage assisté par le transfert capillaire et le séchage par diffusion à travers le réseau poreux, est ainsi obtenue. Il ressort des trois phases observées les commentaires suivants :

Phase 1 : l'eau est transférée par capillarité à la surface de la pierre avec une vitesse rapide. La valeur moyenne de cette vitesse est déterminée par une régression linéaire durant cette phase, figure 2(b), elle est à  $4.84 \cdot 10^{-6} \text{ kg. m}^{-2}/\text{s}$  avec un très bon coefficient de corrélation  $R = 0.99$ . Cette vitesse d'évaporation ( $Q$ ) est déterminée selon l'équation [3], avec  $S$  section de l'éprouvette. Cette période de dé-saturation implique que les sels contenus dans l'eau précipitent à la surface de la pierre.

$$\frac{\Delta M}{S} = -Q \cdot t + d \quad [3]$$

Phase 2 : au-delà du degré de saturation critique  $S_c$  (de 66 %), où le transfert capillaire est insuffisant et le transport de l'eau est très lent, cette phase s'amorce. Au dessus de  $S_c$ , l'eau est transférée sous forme liquide, au dessous, elle est transportée en vapeur.

Phase 3 : la perte de masse devient minimale et l'évaporation se fait par diffusion à travers le réseau poreux dépendant ainsi de la structure de la pierre et les sels précipitent et cristallisent dans les pores (Bromblet, 2002).

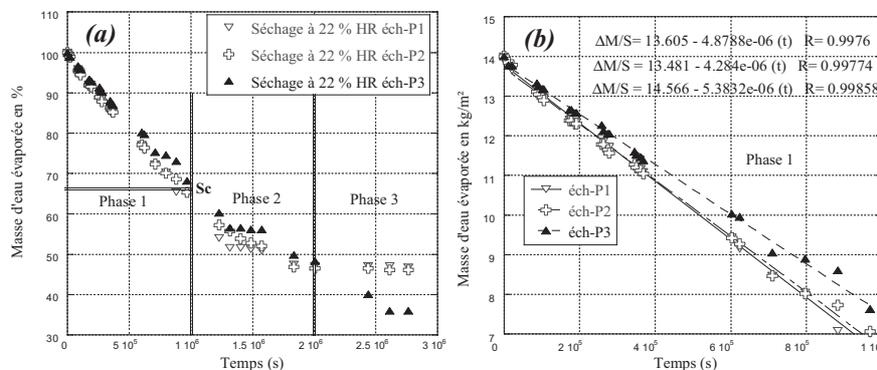


Figure 2. Courbes d'évaporation d'eau à HR = 22 % ; (a) : trois stades obtenus marquant la valeur critique  $Sc$  ; (b) : phase 1 indiquant la vitesse d'évaporation

#### 4.2.2. Perméabilité à la vapeur d'eau et isothermes d'adsorption

La perméabilité définit la capacité du milieu poreux à se laisser traverser par la vapeur d'eau en conditions non saturées. La valeur moyenne du coefficient de perméabilité à la vapeur d'eau ( $\beta$ ), déduit également d'une régression linéaire, figure 3(a), est de  $3.41 \cdot 10^{-9}$  kg. m<sup>2</sup>/s. Par ailleurs, les isothermes d'adsorption caractérisent l'aptitude du milieu poreux à fixer les molécules d'eau, figure 3(b). Il est constaté pour chaque HR deux stades décrits ci-après :

Stade 1 : l'isotherme augmente rapide, l'adsorption se fait progressivement jusqu'à constituer une monocouche recouvrant toute la surface externe des pores. Stade 2 : l'isotherme est quasi-linéaire, l'adsorption est multimoléculaire avec un épaissement progressif de la couche adsorbée.

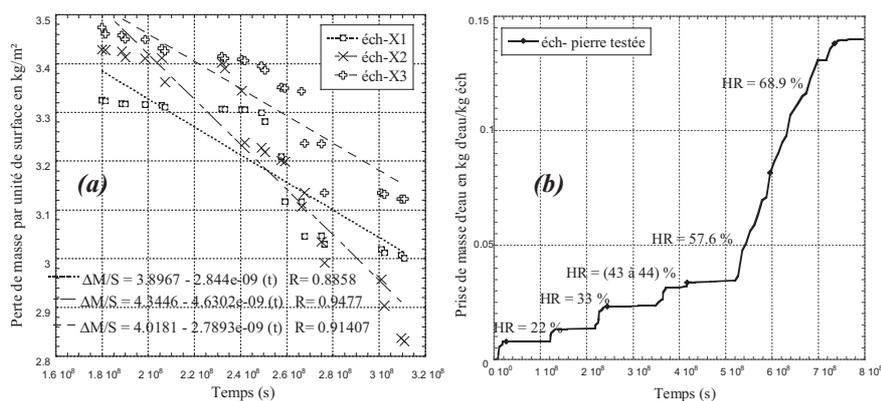


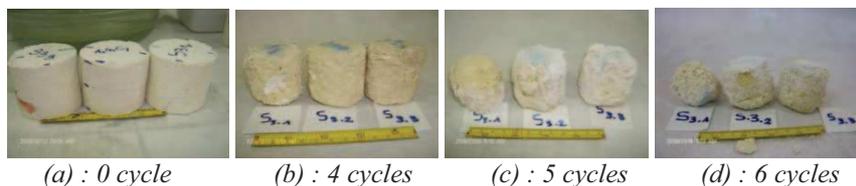
Figure 3. (a) : perméabilité à la vapeur d'eau, (b) : isothermes d'adsorption

#### 4.3. Comportement mécanique

Un examen aux ultra-sons effectué in-situ a permis de fournir des informations sur le choix des aires propices pour le prélèvement des échantillons les plus sains destinés aux essais mécaniques. Les aires choisies sont celles caractérisées par la meilleure densité et homogénéité, reflétées par une vitesse de propagation élevée et stable des ondes ultra-soniques. La résistance mécanique à la compression et à la traction de cette pierre est respectivement de 8.47 MPa et de 1.56 MPa. La valeur assez faible des résistances trouvées sont caractéristiques des calcaires tendres de faible densité et de résistance à la compression compris entre de 5 MPa et 12 MPa. Cette relative faiblesse de la résistance est propice à l'accélération avec le temps de la dégradation du substrat pierreux. A noter qu'il est important de connaître ces caractéristiques mécaniques pour le choix des pierres de remplacement dans le cas d'une opération de maintenance ou de réhabilitation.

#### 4.4. Vieillissement accéléré

Ce test a démontré l'extrême vulnérabilité de la pierre étudiée à l'action des sels, photo 2(a, b, c et d). Même si la cristallisation/l'hydratation de ce sel ont fait l'objet de plusieurs études, la compréhension du mécanisme destructif reste actuellement partielle. Plusieurs auteurs ont attribué les dommages causés par la mirabilite au changement de volume. D'autres ont montré que la destruction du matériau poreux est causée par les pressions de cristallisation de ce sel dans le milieu poreux (Arnold, 1995). De ce fait, la pierre se désagrège selon un mécanisme physico-chimique.



**Photo 2.** Vieillissement accéléré dans une solution de la mirabilite

#### 4.5. Morphologies et mécanismes d'altérations

Les résultats obtenus lors de cette vaste investigation, ont permis de mettre en exergue les agents et les mécanismes qui sont à l'origine des morphologies d'altération observées sur la pierre lors du diagnostic visuel. En effet, la forte teneur en calcite dans cette pierre calcaire favorise fortement sa dissolution, son érosion et sa desquamation photo 3(a-b), selon un mécanisme physico-chimique en présence d'eau comme vecteur principal de dégradation. Par ailleurs, cette pierre est caractérisée par une dispersion importante de la taille des pores. Cette dispersion est

marquée par les valeurs trouvées de la porosité totale et la vitesse de capillarité. La porosité  $N_{48}$  participe de façon prépondérante au passage des fluides vers la surface de la pierre et minimise leur stockage. Quant au transfert hydrique, il est caractérisé par une cinétique de capillarité qui est importante par rapport à l'évaporation et à la perméabilité. Cette situation indique qu'il y a toujours une humidification de la surface de la pierre sur les façades du bâtiment et donc précipitation des sels sur cette même surface. Indépendamment de leurs concentrations initiales, les sels précipitent donc en surface où ils participent au développement d'encroûtements constitués d'un dépôt de poussières cimentées par le gypse selon un mécanisme de nature chimique. Ce phénomène explique largement la fameuse appellation de ' *Pierre qui pleure* ' après un événement pluvieux. En outre, l'humidification de façon permanente de cette surface associée avec la lumière et la chaleur, favorisent l'apparition des organismes vivants, selon un mécanisme purement biologique (Icomos, 2007), photo 3(c-d). L'épreuve de vieillissement accélérée a clairement démontré clairement la vulnérabilité de la pierre de Diar-El-Mahçoul à l'action des sels. En effet, la pierre se désagrège à cause de phénomènes de cristallisation/dissolution des sels selon un mécanisme physico-chimique.



**Photo 3.** Morphologies d'altération, (a) : érosion et alvéolisation, (b) : désagrégation et perforation par des micro-organismes, (c) : algues et lichens, (d) : algues, lichens, champignons mis en évidence par le Vidéo-microscope

## 5. Conclusion

Cette recherche a permis d'identifier clairement les origines et les mécanismes d'altération des pierres de construction de Diar-El-Mahçoul. Les résultats obtenus permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- la nature pétrographique, la composition minéralogique et les propriétés pétro-physiques expliquent clairement la sensibilité de cette roche à l'eau ;
- ce sont les sels véhiculés par l'eau cristallisant en surface qui génèrent inévitablement des encroûtements (gypse), des désagrégations, des pertes de matière, des desquamations et des exfoliations ;
- les recouvrements biologiques (algues, champignons, lichens...) apparaissent sur la pierre souvent mouillée, eu égard à leurs exigences en luminosité, humidité et température. Ils ne se développent pas dans les zones affectées de pertes de matière ni à proximité des croûtes noires résultantes des sels nocifs ;

– certaines morphologies d'altération, comme les fissures, les fractures, les éclatements sont en majorité dues aux sollicitations mécaniques (surcharges, séismes, chocs) dépassant la résistance en compression de la pierre.

En définitive, l'investigation entreprise a clairement montré que les principaux mécanismes d'altération de la pierre étudiée sont de nature chimique, physico-chimique et biologique. Les agents impliqués dans ces mécanismes sont essentiellement les organismes vivants et les sels transportés par l'eau en tant que vecteur. De ce fait, l'action de l'eau sur la pierre se manifeste de manière indirecte par son cheminement à travers le réseau poreux, sa composition et sa capacité à dissoudre, déplacer et/ou précipiter les minéraux. Eu égard à la similitude des morphologies d'altérations constatées, ce même diagnostic peut être étendu à l'ensemble des bâtiments de la cité de Diar-El-Mahçoul.

## 6. Bibliographie

- Arnold A., (1995), « Evolution des sels soluble dans l'altération et la conservation des monuments ». In *pietra dei monumenti nel suo ambiente fisico*, Istituto poligrafico e zecca dello stato Libreria dello Stato, p. 195-213.
- Blas de Roblès J-M., Sintès C. , (2003) : *Sites et monuments antiques de l'Algérie*, édisud archéologies.
- Bromblet P., Oriol G., Martinet G., Philippon J., Verges-belmin V., (2002), « Altération des pierres des monuments », *Géopré : association pour l'étude de l'environnement géologique de la préhistoire et des interactions entre l'homme et son cadre de vie*, -ISBN 2 90 6553 04 2.
- Dessandier D., Bromblet P., Mertz J.D., (2000), « Role of the clays in the modification of hygric properties: consequence on the mechanism of plate's exfoliation of the tuffeau », *Proceedings of the 9<sup>th</sup> international congress on the deterioration and conservation of stone*, Venice, 19-25 June 2000, in press.
- Jeannette D. et Hammeker C., (1995), « Facteurs et mécanismes des altérations », *la conservation de la pierre monumentale*, édition Min. culture et presse CNRS pub. p 5-20.
- Icomos/Isacs., (2007), *illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Glossary EFv1.ppt, version 1: 2007-01-22, ICOMOS, International Scientific Committee for Stone (ISCS).
- Lrmh, (2007), procédures d'essai de laboratoire : n° SP001, n° SP002 et n° SP003, les normes de références : NF B10-503, EN 1936, NF B10-504, pr EN (WI00246036), NF B10-502, EN 1925.
- Roussel Tournier B., (1991), Transfert par capillarité et évaporation dans des roches, rôle des structures de porosité, Thèse Université Louis Pasteur Strasbourg I.

# Comparaison entre photomodélisation et acquisition par laser scanner pour la réalisation d'un carnet de santé de monument

Xavier Brunetaud<sup>(1,2)</sup>, Chiara Stephani<sup>(1,3)</sup>, Cristophe Canal<sup>(2)</sup>, Yann Ueberschlag<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Université d'Orléans, CNRS/CRMD UMR 6619, 1 b rue de la Férellerie, 45071 Orléans Cedex 02, FRANCE, [xavier.brunetaud@univ-orleans.fr](mailto:xavier.brunetaud@univ-orleans.fr)

<sup>(2)</sup> Université d'Orléans, Polytech'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans Cedex 02, FRANCE

<sup>(3)</sup> UMR CNRS/MCC 694 MAP, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille, 184 avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France

*RESUME* : Ce travail s'intègre dans la réalisation du carnet de santé du château de Chambord (projet SACRE). Le point de départ est la construction d'un modèle 3D qui sert de référencement spatial pour toutes les informations nécessaires au diagnostic détaillé de l'état d'altération de l'ouvrage. Le choix de la méthodologie à utiliser pour réaliser cette numérisation 3D de l'ouvrage repose sur un compromis entre la rapidité de réalisation, son coût, et sur la pertinence du format pour la base de donnée. Dans l'objectif de définir ce bon compromis, nous avons réalisé une étude comparative entre l'utilisation de la photomodélisation et l'acquisition par laser scanner. Nous exposons dans cet article les différentes étapes permettant d'obtenir un modèle fiable avec les deux techniques, ainsi qu'une critique des avantages et inconvénients de chacune.

*MOTS-CLES* : Photogrammetrie, laser scanner, patrimoine historique

*ABSTRACT* : This work deals with the realization of a health record for the castle of Chambord (SACRE project). The starting point is building a 3D model whose purpose is to spatially reference all needed data for a detail diagnosis of the state of degradation of the castle. The method to be used for 3D digitalization lies on a balance between quickness of execution, cost, and relevance with respect to data organization. In order to find the good balance, we realized a comparative study between photomodeling and laser scan. In this paper, we present the different steps needed to build a reliable 3D model with both techniques, with a criticism of the advantages and disadvantages of each.

*KEY WORDS* : Photogrammetry, laser scanner, cultural heritage

## 1. Introduction

La photogrammétrie et le laser scanner sont des technologies numériques qui permettent de générer des modèles 3D réalistes et de haute qualité dans la science de la conservation [1][2][3]. La photogrammétrie est utilisée pour la documentation

d'ouvrage [4][5][6][7]. Cette technique simple et peu coûteuse permet d'obtenir un modèle texturé avec un appareil photographique numérique. La photogrammétrie a été utilisée pour réaliser un suivi de l'ouvrage pour en estimer la cinétique d'altération [8]. En géoscience appliquée, la photogrammétrie est utilisée en relation avec la photographie aérienne pour la cartographie et la documentation de glissements de terrains et les déformations du sol suite à un séisme [9][10]. Elle est aussi utilisée en géologie et en géotechnique comme outil de mesure [11][12]. L'analyse spatiale régionale est utilisée en archéologie pour la documentation de grands sites. Une étude photogrammétrique à grande échelle a été réalisée pour cartographier les géoglyphes de la période Nasca au Pérou [13]. Un hélicoptère autonome peut être utilisé comme support d'appareil photographique afin de réaliser des images aériennes à faible altitude pour modéliser des terrains ou de l'architecture [14][15]. L'utilisation du laser scanner est une technique qui tend à se répandre, notamment grâce au prix décroissant du matériel nécessaire. Le laser scanner est utilisé pour la modélisation 3D de faces verticales comme des murs ou plus généralement des éléments d'architecture [3]. L'extraction des textures à partir de prises de photographies multiples permet d'éviter les artefacts mobiles ou fixes comme les touristes et les arbres [16]. La photogrammétrie et laser scanner sont deux techniques maintenant bien maîtrisées, et qui semblent pouvoir s'appliquer à des domaines relativement proches.

Ce travail s'intègre dans le projet SACRE, financé par la région Centre, dont le premier objectif est la réalisation du carnet de santé du château de Chambord. Le support est un modèle 3D qui sert de référencement spatial pour localiser toutes les informations nécessaires au diagnostic détaillé de l'état d'altération de l'ouvrage : localisation des dégradations, conditions météorologiques, archives historiques et architecturales, rapports d'analyse de prélèvements. Nous développons en parallèle une interface spécifique à l'outil « carnet de santé » basé sur la plateforme NUBES [17][18]. Il s'agit d'un système de base de données qui permet le référencement spatial des informations sur le modèle 3D de l'ouvrage. Le modèle 3D produit doit donc satisfaire à certaines contraintes liées à la plateforme utilisée, notamment la capacité du modèle à pouvoir être segmenté et déplié en 2D de manière lisible. Il s'agit d'un point particulièrement important car les différentes cartographies (altération, datation...) seront délimitées sur les éléments du modèle dépliés en 2D. Le choix de la méthodologie à utiliser pour réaliser cette numérisation 3D de l'ouvrage repose sur un compromis entre la rapidité de réalisation, son coût, et sur la pertinence des données recueillies en vue de réaliser le support de base de données. Dans l'objectif de définir ce bon compromis, nous présentons une étude comparative entre l'utilisation de la photomodélisation et l'acquisition par laser scanner pour obtenir le modèle de la tour du Chaudron. Nous exposons dans cet article les différentes étapes permettant d'obtenir un modèle fiable avec les deux techniques, ainsi qu'une critique des avantages et inconvénients de chacune.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Support de l'étude : La tour du Chaudron

Cette étude comparative est basée sur l'acquisition 3D de la tour du Chaudron, qui appartient au château de Chambord (Fig. 1). Cette tour d'environ 10 m de haut et 20 m de diamètre revêt un intérêt particulier dans le projet SACRE car elle n'a été que partiellement restaurée, et comporte donc des parties très endommagées. Grâce à de précédents travaux [19][20], nous disposons de nombreuses informations d'ordre historique (datation des pierres, restaurations successives), sur la nature des pierres utilisées, ainsi que d'une cartographie précise des différentes dégradations observables sur site. De plus, nous y avons implanté des capteurs pour relever la température et l'humidité dans les pierres ainsi qu'une station météorologique. D'un point de vue de la méthodologie d'acquisition 3D, la présence des douves à proximité pose un problème de recul limité ou occasionne des occlusions (artefact masquant tout ou partie de l'ouvrage). Cette tour représente donc un cas d'étude pertinent car à la fois bien documenté et techniquement non trivial.



Figure 1 : Localisation de la tour du Chaudron, château de Chambord

### 2.2. Photomodélisation

Cette étude a débuté par le relevé topographique de 80 points de référence pour fixer un repère commun à toutes les parties du château étudiées, réalisé avec un tachéomètre Leica. Tous les changements de station topographique ont été réalisés sur la base d'une triangulation à 5 points afin de minimiser les erreurs de positionnement. Nous estimons l'incertitude de positionnement de ces points à environ 2 mm. Nous avons utilisé un appareil photographique numérique de type bridge, de résolution 10 Mégapixels, fixé sur un trépied. Le logiciel de photomodélisation utilisé est Autodesk ImageModeler 2009.

La photomodélisation suit un plan bien précis [21][22][23] : Apport de photographies, calibration, modélisation et extraction des textures. Sur les 200 clichés

pris sur site (environ 3 heures de prises de vues), nous avons retenu 43 photographies (Fig. 2). L'erreur moyenne est d'environ 2 cm en comparant les points obtenus par photogrammétrie et ceux issus du relevé topographique.

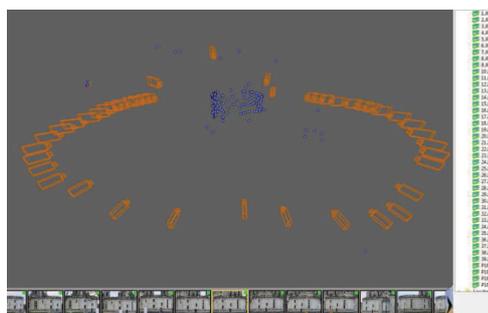


Figure 2 : Origine et orientation des 43 photographies utilisées pour photomodéliser la tour du Chaudron

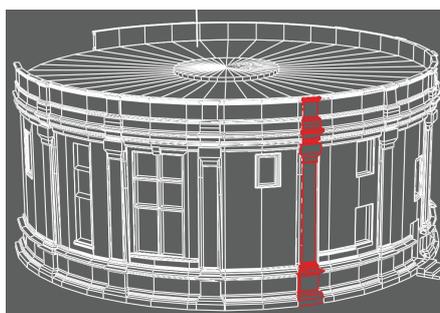


Figure 3 : Modélisation finale des surfaces composant les objets de la tour du Chaudron

Les formes géométriques choisies doivent être suffisamment précises et riches de manière à représenter les principales surfaces qui serviront de support pour le carnet de santé tout en restant suffisamment simple pour être manipulé de manière efficace. Il faut donc essayer de réduire le nombre de surfaces le composant au strict nécessaire [24]. Après vérification que la tour pouvait être assimilée à une symétrie de révolution (à 2 cm près), la forme générale de la tour a été obtenue par extrusion progressive du cercle de base, en adaptant le diamètre du cercle à chaque niveau de manière à suivre le profil vertical de la tour. Nous avons ensuite découpé les contours de tous les objets constituant la tour : travée, pilastres, chapiteaux, fenêtres. En s'appuyant sur ces contours, nous avons modélisé un par un tous ces objets, en vérifiant que toutes les surfaces obtenues sont parfaitement jointives, sans intersection ni superposition, de manière à ce que l'extraction des textures à partir de la projection des photographies produise un résultat correct. Au final, le modèle retenu respecte l'aspect général de la tour (cf. Fig 3), en restant dans une précision qui est de l'ordre de celle de la calibration pour les formes les plus simples (2 cm), mais qui peut localement s'en éloigner pour les parties très complexes ou très altérées de l'ouvrage.

### 2.3. Acquisition par laser scanner

Pour l'acquisition du nuage de points, nous avons utilisé un laser scanner Faro Focus 3D équipé d'un appareil photographique fish-eye intégré. Les photographies à haute définition prises par le scanner sont orientées dans l'espace et permettent d'associer à chaque point du scan la couleur mesurée lors du relevé [25]. L'incertitude de mesure dépend de la distance entre le scanner et l'objet étudié, environ 2 mm dans notre cas. Nous avons choisi une densité surfacique de points correspondant à une maille de 2 mm de côté environ. L'acquisition sur le terrain se rapproche d'un relevé

topographique dont les changements de station sont automatisés grâce à l'emploi de sphères de référence. Dans cet objectif, nous avons réparti 15 sphères à une distance et une hauteur variables autour de la tour. Un ensemble de 7 stations consécutives a été nécessaire pour réaliser le scan complet de la tour du Chaudron (cf. Fig. 4), ce qui a pris environ 2 heures.



Figure 4 : Emplacement des 7 stations pour le relevé au laser scanner

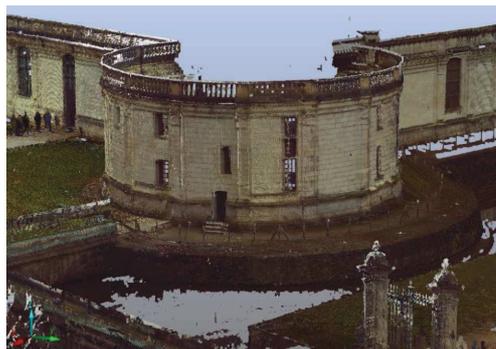


Figure 5 : Nuage de points résultant de l'assemblage des 7 scans

Le logiciel Faro Scene est utilisé pour assembler les différents nuages de points dans un même repère et pour obtenir la coloration des points. Le résultat est donc un nuage de points colorés comportant une grande proportion de données redondantes, principalement au niveau de la tour (cf. Fig 5). Le logiciel RapidForm XOR3 est ensuite utilisé pour le traitement des nuages de points. La première étape consiste à nettoyer le nuage de points de tous les éléments non nécessaires à la modélisation (façades non étudiées, sol, arbres, touristes...). Nous avons choisi une triangulation 2D à projection sphérique centrée sur chaque station, qui reprend la méthode d'acquisition du scan par le laser scanner, et qui permet d'obtenir un maillage s'appuyant directement sur le nuage de point. Les maillages obtenus pour chaque nuage de points sont ensuite fusionnés par une méthode surfacique, qui présente l'avantage de ne réaliser d'approximation qu'au niveau des coutures entre chaque scan. L'étape la plus longue, car plus difficile à automatiser, correspond à la réparation du maillage obtenu après triangulation. Ces corrections peuvent être réalisées de manière automatique pour les petites singularités (quelques mailles au plus). Le maillage comporte tout de même un grand nombre d'occlusions, parfois dues à l'angle de vue qui ne permet pas d'avoir accès à certaines faces, parfois dues à un obstacle visuel local. L'utilisateur du logiciel se retrouve assez rapidement devant une difficulté d'interprétation de ces occlusions, et devant un choix quant à la légitimité de combler ou non ces lacunes. Une dernière étape consiste à déplacer le modèle dans un repère cohérent avec le reste du château (en s'appuyant sur le relevé

topographique), et à segmenter le maillage pour obtenir des objets architecturaux distincts.

### **3. Résultats**

#### *3.1. Comparaison des méthodes*

En termes de temps passé sur site, les deux méthodes sont relativement équivalentes. La prise de photographies est par contre plus souple, et permet de facilement travailler entre deux averses. Les précautions d'utilisation du laser scanner ne permettent pas de prendre le risque de polluer le miroir par des gouttes d'eaux, ou de la poussière. En termes de coût, l'investissement nécessaire en matériel et en logiciel pour la photomodélisation (moins de 1000 €) peut être négligé par rapport à celui du laser scanner (entre 50 et 100 k€). Il faut aussi compter un ordinateur plus puissant pour traiter les nuages de points, car le volume de données est nettement plus important que pour la photomodélisation. Dans les deux cas, il faut compter plusieurs mois de travail à plein temps pour maîtriser parfaitement les logiciels (ImageModeler et RapidForm). L'automatisation des procédures permettant d'obtenir les nuages de points à partir du laser scanner produit en quelques jours un résultat brut, qui peut suffire pour des applications documentaires liées à la conservation du patrimoine. En comparaison, la photomodélisation de la tour du Chaudron prend au minimum deux mois de travail à un utilisateur maîtrisant ImageModeler.

#### *3.2. Rendu général*

Le rendu général de la tour du Chaudron peut sembler relativement similaire en comparant le résultat de la photomodélisation (Fig. 6) et le laser scanner (Fig. 7). A cette distance de visualisation, le niveau de détail est dans les deux cas satisfaisant. La photomodélisation présente le net avantage de générer un modèle beaucoup plus léger à manipuler, ce qui permet d'envisager une visualisation sur une plateforme web sans réduire la qualité du modèle. La texture du maillage issu du laser scanner s'appuie directement sur la couleur des points du scan (vertex color), ce qui ne permet pas de réduire la densité du maillage sans directement perdre de l'information texturale. Une solution consiste à passer en jpeg mapping, c'est-à-dire en projetant d'information colorimétrique sur une image jpeg, et en associant automatiquement des morceaux de cette image à chaque facette. L'information texturale est alors stockée dans l'image jpeg et non sur les points, ce qui permet de simplifier le modèle sans trop réduire la qualité de l'aspect visuel. Comme les textures en jpeg mapping sont plus lourdes à gérer que le vertex color, il faut réduire drastiquement la densité du maillage pour alléger le modèle résultant. Par extrapolation, le modèle issu de la photomodélisation équivaut à un modèle laser scanner en jpeg mapping simplifié de manière à ne conserver que les points essentiels à la description des formes de l'ouvrage, et dont chaque facette possède l'apparence initiale du nuage de points.



Figure 6 : Rendu général de la tour du Chaudron par photomodélisation



Figure 7 : Rendu général de la tour du Chaudron par laser scanner

### 3.3. Rendu détaillé

En ce qui concerne les détails, le laser scanner propose sans aucun conteste la meilleure fidélité par rapport à l'ouvrage réel. Contrairement à la photomodélisation (Fig. 8), la précision du scan permet de délimiter d'un point de vue volumique les zones altérées (Fig. 9), la présence des joints de mortier, les parties manquantes... Vu que la très grande précision du scanner peut laisser supposer que tous les éléments présents dans le modèle sont représentatifs de l'œuvre scannée, il semble nécessaire que chaque modification soit renseignée pour mettre en évidence les parties interprétées par rapport aux parties réelles. Le modèle issu du scanner présente donc un risque potentiel lié à son utilisation d'un point de vue historique, si les modifications réalisées sur le scan sont fusionnées avec le reste du modèle. Il faut donc toujours à minima conserver une version brute du modèle.



Figure 8 : Détail d'une partie altérée de la tour du Chaudron issu de la photomodélisation



Figure 9 : Détail d'une partie altérée de la tour du Chaudron issu du scanner laser

### 3.4. Compatibilité avec l'interface de traitement : dépliage 2D des objets 3D



Figure 10 : Exemple de dépliage 2D d'un objet photomodélisé avec ImageModeler

Le dernier point de comparaison concerne l'utilisation qui est faite du modèle. Dans notre cas, notre objectif est de charger le modèle de la tour du Chaudron dans NUBES [18], puis d'utiliser une interface spécifique pour cartographier les surfaces, sur la base d'objets dépliés en 2D. En ce qui concerne la photomodélisation, il est possible de contrôler le mode de projection 2D (appelé UV projection), et de vérifier la pertinence de ce dépliage 2D. Pour les objets relativement plans, une projection planaire permet souvent de générer une surface dépliée correcte (Fig. 10). Cependant, pour les objets au volume plus prononcé, il est presque systématiquement nécessaire de réaliser ce dépliage manuellement. En ce qui concerne le laser scanner, le principe du vertex color est incompatible avec un dépliage 2D de la texture car cette texture s'appuie sur les couleurs des points environnants et non une information surfacique. L'autre solution consiste à texturer le modèle en jpeg mapping, ce qui revient à réaliser une texture pour chaque petite facette du modèle, comme c'est le cas pour la photomodélisation. Cependant, l'image 2D qui contient la texture de l'objet est composée d'une mosaïque de facettes, sans lien lisible entre ses éléments. Il n'existe donc actuellement aucune solution automatisée pour déplier en 2D lisiblement les objets d'un modèle issu d'un scan.

#### 4. Conclusions

La restitution tridimensionnelle des formes photomodélisée se base sur une interprétation de l'architecture et sur l'extraction d'informations photométriques pertinentes. La précision du modèle résultant est donc adaptable à l'utilisation que l'on souhaite en faire, sous réserve de la définir préalablement. La photomodélisation utilise des hypothèses architecturales pour compléter localement une forme prévisible mais masquée et ainsi interpréter les occlusions. Le coût en temps de travail peut rapidement devenir irréaliste si l'ouvrage est grand ou trop complexe et que l'on souhaite conserver un haut degré de détail. Le côté systématique du laser scanner

permet d'acquérir avec une bonne précision les formes géométriques les plus variées. La manipulation est relativement rapide et la restitution est cohérente avec les données d'entrée, ce qui représente un gain en termes de temps de travail et de fidélité du modèle. Le résultat est beaucoup plus détaillé qu'en photomodélisation, même si l'aspect général peut sembler similaire. Le traitement des occlusions peut poser un problème étique lié à la fidélité du modèle car il est difficile de distinguer les corrections de la réalité lorsque les modifications sont fusionnées au modèle. A cause des contraintes liées au dépliage 2D des objets modélisés, et dans l'état actuel d'avancement de nos travaux, seule la photomodélisation peut être utilisée pour générer le modèle 3D support du carnet de santé. Le bon compromis réside donc dans l'utilisation de la photomodélisation lorsque les formes sont simples, et du laser scanner pour documenter les formes à la fois complexes et pertinentes. Par exemple, la documentation et le suivi d'une altération de type desquamation en plaques (Fig. 9) est un cas où l'utilisation du laser scanner est indispensable.

## 5. Bibliographie

- [1] Karsten Lambers, Henri Eisenbeiss, Martin Sauerbier, Denise Kupferschmidt, Thomas Gaisecker, Soheil Sotoodeh, Thomas Hanusch, 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* 34 (2007) 1702-1712
- [2] P. Debevec. Making "The Parthenon", *Proceedings of 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage*, Pisa, Italy, 2005.
- [3] Boehler, W., Marbs, A., 3D scanning instruments, in: Boehler, W. (Ed.), *Proceedings of the CIPAWG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, Ziti, Thessaloniki (2002) 9–18.
- [4] Koutsoudis, A., Arnaoutoglou, F., Chamzas, C., On 3D reconstruction of the old city of Xanthi. A minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007) 26–31.
- [5] Yastikli, N., Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning. *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007) 423–427.
- [6] Yilmaz, H.M., Yakar, M., Gulec, S.A., Dulgerler, O.N., Importance of digital closerange photogrammetry in documentation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage* 8 (2007) 428–433.
- [7] Fujii, Y., Watanabe, K., Murakami, K., Documentation activities of cultural heritage using a photogrammetric technique for the restoration and conservation of Buddhist Monastery of Ajina Tapa, Tajikistan. *Journal of Japan Society of Engineering Geology* 48 (2007) 258–264.
- [8] Yukiyasu Fujii, Enrico Fodde, Kunio Watanabe, Kazuya Murakami, Digital photogrammetry for the documentation of structural damage in earthen archaeological sites: The case of Ajina Tapa, Tajikistan, *Engineering Geology* 105 (2009) 124–133
- [9] Brückl, E., Brunner, F.K., Kraus, K., Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology* 88 (2006) 149–159.

- [10] Kanibir, A., Ulusay, R., Aydan, Ö., Assessment of liquefaction and lateral spreading on the shore of Lake Sapanca during the Kocaeli (Turkey) earthquake. *Engineering Geology* 88 (2006) 307–331.
- [11] Fujii, Y., Takemura, T., Takahashi, M., Lin, W., Surface features of uniaxial tensile fractures and their relation to rock anisotropy in Inada granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 44 (2007) 98–107.
- [12] Fujii, Y., Takahashi, M., Hori, S., Three-dimensional topography of fracture surfaces obtained by a digital photogrammetric technique. *International Journal of the JCRM* 3 (2007) 29–34.
- [13] Sauerbier, M., Lambers, K., A 3D model of the Nasca lines at Palpa (Peru), *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV-5/W10, 2003.
- [14] Eisenbeiss, H., Zhang, L., Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVI-5 (2006) 90-96.
- [15] Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M., Zhang, L., Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXIV-5/C34 (2005) 238-243.
- [16] Sotoodeh, S., Outlier detection in laser scanner point clouds. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVI-5 (2006) 297-302.
- [17] De Luca, L., Véron, P., Florenzano M. « A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements », *visual computer*, vol. 23, 2007, p. 181-205.
- [18]  
[http://www.map.archi.fr/nubes/NUBES\\_Information\\_System\\_at\\_Architectural\\_Scale/Home.html](http://www.map.archi.fr/nubes/NUBES_Information_System_at_Architectural_Scale/Home.html)
- [19] Badosa S., Beck K., Brunetaud X., Al-Mukhtar M. (2010). Characterization of stone weathering: a case study for Chambord castle, France. 8th International Symposium on the conservation on Monuments in the Mediterranean Basin (31 mai - 2 juin 2010 à Patras, Grèce).
- [20] Badosa S., Beck K., Brunetaud X., Al-Mukhtar M., (2010), Stones and quarries of Castle of Chambord, France, 19th Congress of the Carpathian Balkan Geological Association (23-26 September 2010 à Thessalonique, Grèce).
- [21] De Luca Livio, *la photomodélisation architecturale*, Eyrolles, (2009) 264 pp.
- [22] Linder, W., *Digital Photogrammetry Theory and Applications*. Springer, Berlin (2003) 189 pp.
- [23] Schenk, T., *Digital Photogrammetry Volume I*. TerraScience, Laurelville (1999) 422 pp.
- [24] Brunetaud, X., Beck, K., Al-Mukhtar, M., « Méthodologie d'acquisition d'un modèle du Château de Chambord », 27èmes rencontres de l'AUGC, Saint Malo, France, 2009.
- [25] Gaisecker, T., Pinchango Alto, 3D archaeology documentation using the hybrid 3D laser scan system of RIEGL. Baltsavias, E., Gruen, A., Van Gool, L., Pateraki, M. (Eds.), *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. Taylor & Francis, London (2006) 459-464.

## L'aménagement du territoire en pays karstique. Cas de la région de Tlemcen (nord-ouest algérien)

Fouzia Bensaoula <sup>1,3\*</sup> et Wafae Soltani <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département d'hydraulique, Faculté de Technologie, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

<sup>2</sup>Laboratoire Travaux Publics Ouest –Unité de Tlemcen

<sup>3</sup>Laboratoire 25 de l'UABB de Tlemcen

\* [fbensaoula@gmail.com](mailto:fbensaoula@gmail.com)

---

*RÉSUMÉ. Située à l'extrême ouest du territoire algérien, Tlemcen est caractérisée par son contexte géographique et géologique. C'est une zone effondrée à la suite d'une tectonique cassante. Elle est entourée de reliefs constitués de formations karstifiées.*

*Le développement socio-économique de la ville de Tlemcen a contraint les autorités locales à planifier l'extension urbaine plutôt sur les reliefs rocheux karstiques entourant l'agglomération de Tlemcen. Au cours des études géotechniques élaborées par les services compétents il s'est avéré, que les formations du sous sol présentent des indices de karstification qui pourraient mettre en danger les constructions futures. Dans ce travail nous mettons en relief, les différentes difficultés rencontrées au cours de la réalisation de certains projets de construction ainsi que les différents remèdes préconisés. Enfin nous donnerons quelques recommandations en vue d'une meilleure connaissance de ces milieux karstiques futures assises pour de futurs projets de construction.*

*ABSTRACT. Located at the extreme west of Algeria, Tlemcen is characterized by its geological and geographical context. It's a collapsed zone resulting from a brittle tectonics. This zone is surrounded by reliefs constituted of karstified limestone and dolomitic structures.*

*The Socio-economic development trends of the city of Tlemcen have constrained the local authorities to plan its urban extension rather on the Karstic rocky relief surrounding Tlemcen city. During geotechnical studies undertaken by expert services, it became obvious, that underground structures presenting clear karstification would certainly endanger future construction developments. In this work, we highlight various difficulties encountered during the implantation phase of some construction projects as well as various remedial strategies suggested to overcome the problems. Finally, we will give recommendations to bring about a better understanding of these karstic environments, the future basis for future constructions.*

*MOTS CLEFS: Tlemcen, aménagement urbain, construction, karst, cartographie.*

*KEYWORDS: Tlemcen, urban planning, construction, karst, mapping.*

---