

Le rôle paradoxal de l'eau   Lalibela (Ethiopie) : Enjeux et méthodes pour la conservation d'un affleurement naturel anthropisé

Rémy Chapoulie | chapoulie@u-bordeaux-montaigne.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Romain Mensan | mensrom@gmail.com

Centre Français des Etudes Ethiopiennes (CFEE)

Loic Espinasse | loic.espinasse@archeovision-prod.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Pascal Mora | pascal.mora@u-bordeaux-montaigne.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

François Daniel | francois.daniel@archeovision-prod.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Emma Lamothe-Dubrocca | emma.lamothedubrocca@archeovision.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Bruno Dutailly | bruno.dutailly@u-bordeaux.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Caroline Delevoie | delevoie@u-bordeaux-montaigne.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Vincent Baillet | vincent.baillet@u-bordeaux-montaigne.fr

Archeovision plateforme, Arch osciences-Bordeaux UMR 6034 CNRS-Université Bordeaux Montaigne-Université de Bordeaux

Kidane Ayalew | kidane_1621@yahoo.com

Centre Français des Etudes Ethiopiennes (CFEE)

Marie-Laure Derat | Marie-Laure.derat@cnrs.fr

CNRS, UMR 8167 Orient et Méditerranée

Abstract

The site of Lalibela is the result of Tertiary volcanic activity which led to the formation of a vast outcrop of basaltic slag from which churches were carved. This reddish rock which is particularly suitable for carving, is extremely interactive with water. It was beneficial for the impressive excavation phases, but is now problematic for conservation purposes. Digging meant either the penetration of water into the massif and its erosion, but also the protection of the monuments from water stagnation. This is a very paradoxical situation in which water plays an alternately positive and negative role. Due to its sacred dimension, any intervention on the rock must be discussed and validated by the community. 3D technologies were used to carry out an assessment of the state of the site, to create a virtual 3D model that can be accessed and consulted remotely by all the specialists faced to the conservation problem; to trace the historical evolution of the site.

Keywords

Lalibela, eau, Conservation, Technologies 3D

1- Lalibela un affleurement naturel creusé par l'homme : enjeux pour sa conservation

1-1 Lalibela aujourd'hui

Situé à 645 km au nord-ouest d'Addis Abeba, le site de Lalibela est un sanctuaire et lieu de pèlerinage chrétien qui conserve les vestiges de onze églises creusées dans la roche. Ces églises sont réparties en deux groupes séparés de quelques centaines de mètres, auxquels s'adjoint une église isolée, Saint-Georges, devenue l'emblème du site parce qu'elle est sculptée en forme de croix. La création de ce haut-lieu du christianisme éthiopien a longtemps été attribuée au seul roi Lālibālā, membre de la dynastie Zāg^wē, qui a régné au tournant des XII^e et XIII^e siècles. Classé au patrimoine de l'UNESCO depuis 1978, le site a fait l'objet de plusieurs campagnes de restauration depuis le début du XX^e siècle jusqu'aux années 2010, pour aboutir à l'installation temporaire d'abris au-dessus de cinq églises afin de les protéger des infiltrations d'eau et de l'érosion consécutives aux pluies saisonnières. Aujourd'hui, le site de Lalibela est l'un des principaux centres religieux éthiopiens où se pressent des milliers de fidèles lors des grandes fêtes, attirant des pèlerins venus des quatre coins du pays. C'est également une petite ville en plein développement, en raison de la croissance régulière du nombre de touristes visitant les églises, jusqu'à l'interruption brutale des visites du fait de la pandémie de COVID depuis 2019 et de la guerre en Éthiopie déclenchée en novembre 2020. En mars 2019, un accord entre les gouvernements français et éthiopiens a été signé en vue d'œuvrer conjointement à la conservation, la restauration et la valorisation du site de Lalibela. De cet accord est né en particulier un programme, intitulé 'Sustainable Lalibela', financé par l'Agence française de développement (AFD), qui compte plusieurs volets : la restauration des monuments et des peintures, à l'archéologie, la numérisation des manuscrits, la création d'un centre de ressources numériques. L'objectif est de mettre à disposition sur le site toutes les données issues des recherches engagées à Lalibela.

1-2 Lalibela dans l'histoire

L'histoire du site de Lalibela peut être appréhendée grâce à la documentation manuscrite conservée dans les églises du site, aux inscriptions sur les parois des églises et sur quelques objets en bois, et à l'archéologie. Les études réalisées à partir de la documentation manuscrite, conservée dans la région de Lalibela, fournissent de précieux témoignages historiques. Ce site, longtemps pensé comme la capitale du royaume à l'époque de la dynastie Zāg^wē, apparaît aujourd'hui davantage comme un cœur religieux que comme un centre politique¹. À compter du XV^e siècle, les églises de Lalibela ont fait l'objet d'attentions régulières de la part des souverains chrétiens d'Éthiopie, qui ont voulu célébrer le culte du saint-roi Lālibālā, tout en contrôlant ce centre religieux. Puis l'intérêt royal a décliné, avant qu'aux XVII^e-XVIII^e siècles une dynastie locale redonne un certain lustre aux églises du site, tout en revendiquant son autonomie vis-à-vis du pouvoir central, désormais installé dans la région de Gondar. Les recherches menées sur le terrain par les moyens de prospections et fouilles archéologiques permettent d'établir un phasage de creusement du site. Elles ont permis d'identifier des vestiges marquant une occupation dès les X^e-XII^e siècles, vestiges qui sont recouverts par les déblais issus de l'excavation des églises. Aux alentours de Lalibela, par exemple à Māy Māryām, Waf Argaf et Waša Mikā'el, plusieurs sites indiquent que la région semble avoir été maîtrisée par une élite puissante avant même l'ascension du roi Lālibālā. Il semble qu'alors le christianisme était déjà présent, mais qu'il devait cohabiter avec d'autres religions².

2- Contextes géographique et géologique

2-1 Paysage

Perchée à 2500 m d'altitude, la ville de Lalibela se situe sur les hauts plateaux de l'Éthiopie centrale. Elle se trouve aux pieds du mont Ašatan, à un étage intermédiaire entre le massif de l'abuna Yosēf (4200 m d'altitude) et la plaine du Takkazē (1800 m d'altitude) traversé par le cours d'eau du même nom qui va rejoindre le Nil bleu au Soudan. La région doit sa formation géologique à l'activité volcanique basaltique tertiaire. Cette activité a engendré un empilement de coulées et d'éjectas qui se sont accumulés sur environ 3000 m d'épaisseur, aussi appelé formation d'Alaji. De bas en haut, l'environnement est constitué de formations basaltiques indifférenciées surmontées par des niveaux lacustres, des tufs et des retombées pyroclastiques. La séquence est scellée au sommet par des rhyolithes. Entre 2400m et 2550m d'altitude environ, sur pratiquement 16 ha s'observent les monuments monolithiques de Lalibela, qui apparaissent au détour des routes montant à la ville comme des sculptures dans la montagne. Onze monuments composent l'ensemble, auquel il faut ajouter les multiples tranchées gigantesques qui enserrant le site, ainsi que les passages et salles souterrains formant un véritable réseau autour des églises proprement dites. Sur les flancs des monuments, des petits hameaux se sont construits abritant des moniales, des familles du clergé. Une grande partie de ces hameaux ont été récemment vidés de leurs habitants pour protéger le site, en ne conservant que les maisons à étage, montées en pierre et couvertes de toit de chaume, jugées les plus remarquables. La ville est désormais repoussée au-delà d'un périmètre de protection.

2-2 Contexte géologique et implication sur la conservation

Les églises rupestres ont été excavées dans une couche de basalte scoriacé correspondant à d'anciennes scories basaltiques accumulées sur les flancs occidentaux d'un volcan actif au cours du Miocène. Elles sont soudées et partiellement altérées par l'oxydation du fer qu'elles contiennent, oxydation qui donne une couleur rouge aux églises. Des bombes volcaniques sont également observées dans ce matériau, allant du kilogramme à plusieurs tonnes. Relativement compacte, cette roche se prête bien à la taille. Sa composition est assez homogène même si quelques coulées de basaltes interstratifiées dans les scories sont observables, soudant quelquefois des paléosols très rubéfiés. Ce sont les parties les plus tendres de la roche qui ont été exploitées lors des premières phases d'occupation, en creusant initialement des galeries de taille et d'orientation différentes en fonction de ces discontinuités lithologiques. Durant les phases postérieures ont été exploités les niveaux de basalte scoriacé sans faire de distinctions. L'analyse pétrographique et minéralogique des basaltes scoriacés révèle la présence de cristaux de zéolites et de minéraux argileux qui déterminent le comportement thermohydro-mécanique de la roche et sa durabilité³. La principale propriété des zéolithes est leur interaction avec l'eau. Ces minéraux sont caractérisés par une grande sensibilité et une grande affinité pour l'eau. En conséquence, les transformations qui en résultent conduisent à la libération ou à l'échange d'éléments chimiques en solution, ce qui favorise la dissolution et la cristallisation des sels et le gonflement des argiles. Limiter l'apport direct en eau revient à inhiber les réactions chimiques dans les zéolithes et réduire le gonflement.

On comprend dès lors l'intérêt que peut représenter l'étude de la circulation de l'eau au sein de ce complexe architectural. Les enjeux forts de conservation ont amené en 2007 le positionnement de 4 'toits' sur les églises, portés par des piliers métalliques. En 2019 un constat d'état est entrepris sur les églises de même que sur les abris

en place. Un des éléments clés de ce constat est la réalisation d'une numérisation 3D exhaustive de l'ensemble du site par le biais d'acquisition de données par lasergrammétrie et photogrammétrie. Les modèles 3D sont, dans un premier temps, prétraités sur site afin de servir de support d'analyse aux spécialistes. Ils seront ensuite finalisés en laboratoire pour offrir une lecture plus globale et précise du site.

Soulignons que l'ensemble du site de Lalibela est un affleurement naturel creusé par l'homme. Les propriétés minéralogiques particulières de la roche, extrêmement interactive avec l'eau, ont permis les creusements impressionnants des monuments, mais sont aussi un vrai handicap pour leur conservation. En effet à partir du moment où l'homme a commencé à creuser cette roche, il a favorisé la pénétration de l'eau dans le massif et donc accéléré son érosion. Les occupants de Lalibela n'ont cessé de creuser le site afin de lutter contre l'érosion hydrique et pour maintenir les monuments hors d'atteinte de la stagnation d'eau. Les premières interventions sur l'affleurement ont irrémédiablement changé l'équilibre naturel du site impliquant pour la conservation des monuments, des interventions perpétuelles de l'homme pour les maintenir en état.

3- Les apports de la 3D

La dimension sacrée du site de Lalibela constitue évidemment un enjeu pour sa conservation. L'ensemble de l'affleurement rocheux est considéré par la communauté comme sacré et donc toute intervention sur la roche se doit d'être discutée et validée avec la communauté hôte. De ce fait les outils 3D constituent un atout majeur pour la conservation à de nombreux égards :

- réaliser en 3D, de manière non intrusive, un état sanitaire de l'ensemble du site afin de documenter les secteurs en danger permettant ainsi de disposer d'un double numérique à très haute résolution à un instant T du site,
- repérer les zones déjà restaurées,
- étudier des fractures parfois difficilement accessibles,
- distinguer les zones protégées par les abris depuis plus de 10 ans de celles qui ne le sont pas,
- créer un outil accessible à l'ensemble de la communauté scientifique, notamment les architectes des monuments historiques, pour faciliter l'étude et la réflexion sur la mise œuvre de solutions à apporter au problème de conservation,
- proposer de nouvelles hypothèses pour les couvertures afin de permettre une meilleure protection des églises et des cours,
- connaître l'épaisseur de la roche en tout point du site,
- générer des ortho-images à partir du modèle 3D, ce qui constitue un support de travail très pertinent pour toute personne œuvrant sur le site,
- protéger et préserver la mémoire du site grâce au Modèle 3D, ce qui devrait permettre par exemple de travailler sur la circulation de l'eau pour tenter d'en maîtriser les effets,
- permettre une analyse comparative des zones à risque en cumulant des numérisations 3D à divers moments.

4- Bilan et perspectives

Le phénomène de dégradation est bien compris pour ce site emblématique. Il s'agit désormais de poursuivre les travaux via le programme 'Sustainable Lalibela' qui comprend entre autres, l'apport des technologies 3D et la

création d'une base de données connectée au Modèle 3D. Celle-ci intégrera toutes les données déjà acquises, des textes anciens aux analyses géochimiques. Il s'agit d'un système d'information référencée en 3D⁴, basé sur le géoréférencement de chaque donnée et permettant dans un second temps d'interroger le système⁵ sur tout questionnement lié à la problématique de conservation du site.

- ¹ DERAT, Marie-Laure, 2018, L'énigme d'une dynastie sainte et usurpatrice dans le royaume chrétien d'Éthiopie du XI^e au XIII^e s., Turnhout, Brepols (Hagiologia, 11)
- ² DERAT, Marie-Laure, BOSCH-TIESSE, Claire, GARRIC, Antoine, MENSAN, Romain, FAUVELLE, François-Xavier, GLEIZE, Yves et GOUJON, Anne-Lise, 2021, « The rock-cut churches of Lalibela and the cave church of Washa Mika'el: troglodytism and the Christianisation of the Ethiopian Highlands », *Antiquity*, 95 (380), p. 467-486
- ³ GIOVANACCI David, MERTZ Jean-Didier, TAYE GEMEDA Blen, GARRIC Antoine et MENSAN Romain, 2022 Non-Destructive Analysis to Investigate the Stone Alterations at a UNESCO World Heritage site *Journal of Human, Earth and Future*, Vol.3, n°2 June 2022 <http://dx.doi.org/10.28991/HEF-2022-03-02-01>
- ⁴ DUTAILLY, Bruno, PORTAIS, Jean-Christophe, GRANIER, Xavier. SIR3D (RIS3D Referenced Information System in 3D). *ACM J. Comput. Cult. Herit.*, Vol. 1, No. 1, Article . Accepted, Publication date: 2022
- ⁵ DUTAILLY, Bruno, CHAPOULIE, Rémy, LACANETTE, Delphine, 2020. SIG3D pour l'étude et la conservation en archéologie. Les Rencontres du Consortium 3D SHS. 2-4 décembre 2019, Nantes, France, p. 1-5