

Suivi de l'évolution des risques sur le patrimoine archéologique côtier : le cas de l'archipel de Kerkennah, Tunisie

Monitoraggio dell'evoluzione dei rischi per il patrimonio archeologico costiero: il caso dell'arcipelago di Kerkennah, Tunisia

par

Katia SCHÖRLE¹, Luc Simiroré DIATTA², Ali DRINE³, Julien SEINTURIER⁴,
Paul FRANÇOIS⁵, Semah BETTAIEB⁶, Luc LAPIERRE⁷

Mots-clés.— Changement climatique, érosion côtière, Tunisie, patrimoine côtier, archéologie.

Résumé.— Entre 2021 et 2023, grâce à une subvention de recherche de la fondation Fyssen, une équipe franco-tunisienne a pu travailler aux îles Kerkennah sous l'égide de l'Institut National du Patrimoine tunisien (INP). Les prospections terrestres, et notamment côtières, initialement conçues pour évaluer le rôle du sel dans les économies antiques et modernes ont révélé non seulement l'étendue des vestiges archéologiques mais également leur vulnérabilité face aux aléas climatiques et aux processus d'érosion en cours. Pour ce faire, une méthodologie a été élaborée afin de comprendre l'évolution du site de Borj El H'ssar. Celle-ci repose sur une approche combinant observations de terrain, géoréférencement des vestiges et des structures archéologiques, la réalisation de relevés photogrammétriques et l'analyse de données géospatiales. Cette démarche a ainsi permis non seulement de numériser l'ensemble des vestiges archéologiques identifiés, mais aussi de mieux appréhender l'organisation spatiale du site. L'analyse de l'évolution du linéaire côtier a mis en évidence une exposition croissante des vestiges face au phénomène d'érosion côtière, avec un taux moyen de recul estimé à 0,33 m/an entre 2012 et 2022, détruisant ainsi le patrimoine archéologique.

Monitoring the evolution of coastal archaeological heritage at risk: the case of the Kerkenna archipelago, Tunisia

Keywords.— Climate change, coastal erosion, Tunisia, coastal heritage, archaeology.

Abstract.— Between 2021 and 2023, thanks to a research grant from the Fyssen Foundation, a Franco-Tunisian team was able to carry out work on the Kerkennah Islands under the auspices of the Tunisian National Heritage Institute (INP). Land-based and, in particular, coastal surveys, initially designed to assess the role of salt in ancient and modern economies, revealed not only the extent of the archaeological remains but also their vulnerability to climatic hazards and ongoing erosion. To this end, a methodology was developed to understand the evolution of the Borj El H'ssar site. This is based on an approach combining field observations, georeferencing of archaeological remains and structures, photogrammetric surveys and geospatial data. This approach has thus made it possible not only to digitise all the identified archaeological remains, but also to gain better understanding of the site's spatial organisation. Analysis of the evolution of the coastline has highlighted the increasing exposure of the remains to coastal erosion, with an estimated average rate of retreat of 0.33 m/year between 2012 and 2022, thereby destroying the archaeological heritage.

1. CNRS, Aix Marseille Université, Centre Camille Jullian, Aix-en-Provence, France, katia.schorle@cnrs.fr

2. Doctorant, Aix Marseille Université, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, France, diatta@cerege.fr

3. Institut National du Patrimoine de Tunisie, Tunis, Tunisie, drineali2@gmail.com

4. Université de Toulon, LIS, Toulon, France, julien.seinturier@univ-tln.fr

5. CNRS, Aix Marseille Université, LA3M, Aix-en-Provence, France, paul.francois@cnrs.fr

6. Université de Sfax, Tunisie, semahbettaib@gmail.com

7. SFPT, AOrOc, Paris, France, luc.lapierre@numericable.fr

INTRODUCTION

Entre 2021 et 2023, dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut National du Patrimoine (INP) de Tunisie et le CNRS, et avec le soutien de la Fondation Fyssen, une équipe franco-tunisienne placée sous la direction d'Ali Drine (INP) et de Katia Schörle (CNRS) a conduit plusieurs missions de recherche aux îles Kerkennah. Ces travaux s'inscrivaient dans le projet exploratoire *Exploitation du sel d'hier à aujourd'hui : production, consommation et pratiques culturelles en Afrique du Nord* (Schörle *et al.*, 2023 ; Schörle *et al.*, 2024), couramment désigné, par souci de concision, sous l'appellation « Projet Kerkennah ».

Constituant le deuxième plus vaste archipel de Tunisie, les îles Kerkennah se situent le long de la côte orientale du pays, au large de la ville moderne de Sfax. Au cours de l'Holocène, à la suite de modifications environnementales qu'a connues le bassin méditerranéen, et liées au changement climatique, les îles Kerkennah se sont progressivement séparées du continent (Broodbank & Lucarini, 2020), formant un espace insulaire distinct, qui demeure étroitement lié aux dynamiques régionales. Cet ensemble insulaire a ainsi connu des occupations successives et diversifiées, associées à des activités économiques et commerciales variées (Mahfoudh, 2000), dont l'exploitation des ressources salifères constitue un élément structurant. Les vestiges historiques, architecturaux et archéologiques conservés permettent aujourd'hui encore d'en appréhender les logiques d'implantation, les modalités d'exploitation et les motivations socio-économiques et culturelles.

Notre programme, centré sur les dynamiques économiques et culturelles liées à l'exploitation du sel, s'est accompagné en 2022 de l'acquisition d'une couverture d'imagerie spatiale Pléiades à haute résolution couvrant l'archipel (Pléiades © CNES, 2022 – Distribution Airbus DS). Cette commande spécifique, réalisée via le Dispositif Institutionnel National d'Accès Mutualisé en Imagerie Satellitaire (DINAMIS) et avec le soutien du Centre National d'Études Spatiales (CNES), visait à doter le projet d'un outil de cartographie fine et actualisée du territoire insulaire. Ces données satellitaires avaient notamment pour objectifs d'évaluer l'extension des salines contemporaines à la lumière des archives disponibles ainsi que d'examiner leurs relations potentielles avec les structures antiques associées à la production et à la transformation des ressources halieutiques, en particulier les installations de salaisons de poisson. Croisées avec les résultats des prospections terrestres, notamment le long du littoral, elles ont permis de cartographier et mettre en évidence non seulement l'ampleur des vestiges archéologiques côtiers conservés, mais également leur vulnérabilité croissante face aux processus d'érosion, sous l'effet conjugué des dynamiques marines et des aléas climatiques (Schörle *et al.*, 2023).

Dans cette perspective, le périmètre d'étude a été progressivement resserré sur le secteur littoral de Borj El H'ssar (برج الحصار) où l'érosion marine joue un rôle déterminant : elle met au jour, en coupe, des aménagements architecturaux significatifs, tout en accélérant simultanément la dégradation.

La méthodologie mise en œuvre sur le terrain s'est articulée autour d'un protocole d'intervention combinant observation, documentation et enregistrement spatial systématique. Elle a reposé sur :

- une observation exhaustive et méthodique de la bande littorale, afin d'identifier les concentrations de vestiges ;
- le repérage et la caractérisation des structures présentant des traces de mortier hydraulique, susceptibles d'être interprétées comme des cuves de salaison ;
- des opérations ponctuelles de nettoyage, limitées et contrôlées, destinées à améliorer la lisibilité des structures sans altérer leur état de conservation ;
- un échantillonnage ciblé des mortiers hydrauliques, soumis à des analyses physico-chimiques, afin d'identifier d'éventuelles signatures organiques compatibles avec des résidus issus de la transformation des ressources halieutiques. Cette approche analytique visait à tester l'hypothèse fonctionnelle d'une utilisation de ces structures comme cuves de salaison, destinées à la production de dérivés du poisson – tels que le *garum*, la *muria* ou l'*allec* – en apportant des arguments matériels susceptibles d'en confirmer l'interprétation ;
- la réalisation de relevés photogrammétriques, permettant la production de modèles 3D précis des aménagements ;
- le géoréférencement et le positionnement précis de l'ensemble des vestiges documentés, en vue de leur intégration dans un système d'information géographique (SIG) et d'un suivi diachronique de leur évolution.

CADRE GÉOGRAPHIQUE

L'archipel de Kerkennah est situé sur la côte est de la Tunisie, au nord-est du golfe de Gabès, en mer Méditerranée (fig. 1). Cette localisation au centre du littoral oriental tunisien fait qu'il a toujours été considéré comme la porte d'entrée de la grande baie de la Petite Syrte (Syrtis Minor), qui englobe les côtes de la Tunisie et de la Libye orientale (Tripolitaine). Cet archipel est habité de manière continue depuis des siècles et a fait l'objet de diverses occupations (Mahfoudh, 2000). Il se caractérise donc par une histoire riche et variée d'occupation anthropique, avec des sites de différentes périodes sur ses îles. Il constitue ainsi avec Jerba, l'un des groupes d'îles les plus importants de Tunisie. L'archipel de Kerkennah se compose de deux îles principales, Gharbia et Cherguia, reliées par le pont d'El Quantara, comme elles l'étaient déjà à l'époque romaine, et de quelques îles secondaires, Gremdi (207 ha), Roumadia (160 ha), Sefnou (50 ha), et Charmedia (environ 5 ha) (fig. 1A). D'une longueur d'environ 35 km pour une largeur de 10 km, et une superficie totale de 15 500 ha, dont un tiers est constitué de sebkhas (dépressions ou lacs salés asséchés), l'archipel se caractérise par un linéaire côtier long de 181 km. La morphologie côtière se distingue ainsi par la présence de falaises ou microfalaises taillées dans différents substrats, des plages de sable limitées et de grandes étendues de marais salants favorisées par une marée importante, tout comme dans le reste du golfe de Gabès.

La localisation de cet archipel dans le golfe de Gabès favorise la manifestation de phénomènes hydrodynamiques complexes, avec une convergence des courants d'origine

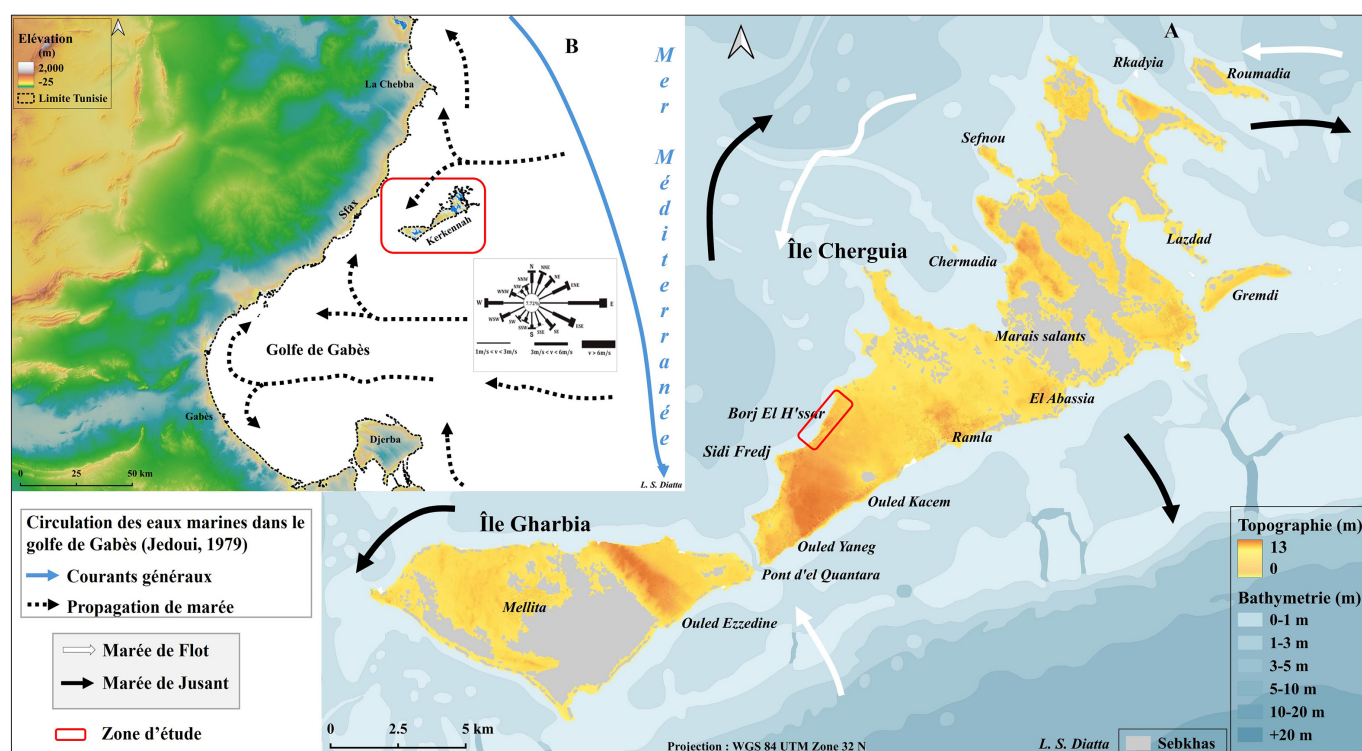


FIG. 1

Carte des îles Kerkennah dans leur contexte régional : en bas à droite, la bathymétrie et la topographie de l'archipel, avec la localisation de la zone de prospection intensive de Borj El H'ssar (A) ; en haut à gauche, le golfe de Gabès et la circulation des eaux marines (B). DAO : L.S. Diatta.

Map of the Kerkennah Islands in their regional context: bottom right, the bathymetry and topography of the archipelago, showing the location of the intensive survey area around Borj El H'ssar (A); top left, the Gulf of Gabès and marine water circulation (B). CAD: L.S. Diatta.

atlantique, entrant par le détroit de Chebba, et des courants d'origine levantine, entrant par le détroit de Sfax (Ben Mustapha, 2007). Le marnage y est très important, avec des marées semi-diurnes qui peuvent atteindre entre 1,8 et 2 m, en raison de l'étendue et de la faible déclivité de la plateforme continentale qui couvre l'ensemble du golfe de Gabès (Oueslati, 2022).

Ainsi, le linéaire occidental, où se situent le site archéologique de Borj El H'ssar et les installations touristiques de Sidi Fredj, est plus exposé aux vents dominants et aux courants marins, tandis que le secteur oriental de l'archipel est davantage protégé de ces agents hydrodynamiques (fig. 1B). L'exposition du secteur occidental aux vents dominants et la complexité lithologique, avec l'alternance de roches dures et de sédiments meubles, favorisent une érosion différentielle, qui se traduit par un profil côtier accidenté, contrairement au secteur oriental, présentant une morphologie plus rectiligne.

La topographie des îles Kerkennah est marquée par une grande platitude, avec un point culminant à 13 mètres d'altitude à Ouled Ezzeddine. Le paysage topographique est ainsi formé par une succession de collines basses et plates, séparées par des sebkhas, des plaines salines et marécageuses. Ce paysage est le résultat d'une série de failles en échelon qui ont créé des horsts et des grabens dans la croûte terrestre. Les horsts sont des blocs de roches soulevés le long des failles, tandis que les grabens sont des blocs abaissés. Les collines basses et plates des Kerkennah sont les horsts qui se sont formés entre les failles en échelon, tandis que les sebkhas sont les grabens.

Cette succession de formes géologiques témoigne de l'activité tectonique qui a eu lieu dans la région et offre un aperçu de l'histoire géologique de cette région côtière de la Méditerranée.

DÉLIMITATION ET CARACTÉRISTIQUES DU SECTEUR ÉTUDIÉ

La zone prospectée s'étend sur une longueur d'environ 1 700 m, pour une largeur moyenne d'un peu plus de 10 m, couvrant ainsi l'estran jusqu'au pied des falaises, soit environ 18 000 m². Ses limites ont été déterminées par l'état du littoral, directement conditionné par l'action de la mer sur le site archéologique de Borj El H'ssar (fig. 2). Au nord-est comme au sud-ouest, les limites de la prospection se matérialisent par la diminution apparente de la densité des vestiges affleurant à la surface de la colline littorale, et ponctuellement observables en section dans les zones où l'érosion entaille le versant ou la falaise. Au sud-ouest, l'urbanisation récente du littoral empêche toute observation. La densité et la nature des vestiges varient considérablement le long de cette bande littorale. Face au site archéologique, des aménagements de grande ampleur sont visibles en coupe : blocs de moyen et grand appareil, dallages sur radier, fondations de murs. La coupe littorale, créée par l'érosion, permet plusieurs observations. Un niveau de sol dallé a ainsi pu être suivi sur une trentaine de mètres, suggérant que le littoral actuel reprend l'orientation d'une rue antique et la présence de blocs de grand appareil le long du littoral évoque l'enceinte de la ville antique et en délimite le noyau urbain.

**FIG. 2**

Localisation du secteur côtier prospecté et distribution spatiale des vestiges archéologiques autour de Borj El H'ssar (antique Cercina). DAO : P. François.

Location of the surveyed coastal area and spatial distribution of archaeological remains around Borj El H'ssar (ancient Cercina). CAD: P. François.

MÉTHODOLOGIE

L'analyse de la zone d'étude s'appuie sur l'exploitation d'images stéréoscopiques Pléiades à très haute résolution. Ces images ont été acquises par programmation, en renseignant des critères d'acquisition qui permettent de produire un Modèle Numérique de Surface (MNS). Pléiades est un satellite à très haute résolution avec une capacité de revisite quotidienne (en tout point du globe) qui fournit des images disposant de 4 bandes spectrales à 2,8 m de résolution (bleu, vert, rouge et proche infrarouge) et un canal panchromatique à 0,7 m de résolution. Ainsi, après évaluation de la cohérence technique et thématique et de la faisabilité du projet, nous avons disposé des données brutes des images Pléiades de chaque portion commandée des îles Kerkennah. Ces dernières ont nécessité des prétraitements, tels que l'orthorectification et le pansharpening.

En effet, les images Pléiades programmées ont été obtenues en format PRIMARY, qui est le niveau de traitement le plus proche de l'image acquise par le capteur, permettant la production du MNS. Cependant, les produits de niveau PRIMARY sont en coordonnées lignes/colonnes du capteur et

ne sont ainsi pas exploitables dans un SIG. L'orthorectification est donc le traitement de correction géométrique qui permet de passer de l'image PRIMARY à l'ortho-image afin de rendre les images superposables sur une carte. Le processus consiste à utiliser le fichier DIM (Digital Image Map) contenant les métadonnées associées à l'image et à lui attribuer le CRS (système de référence de coordonnées) : WGS 84/UTM Zone 32N dans ce cas d'étude.

En outre, les images Pléiades ayant une résolution différente entre les bandes multispectrales et la bande panchromatique, un pansharpening a été appliqué afin de ramener la résolution des bandes multispectrales à celle de la bande panchromatique. La précision au sol des images est ainsi de 0,5 m après rééchantillonnage.

Ces prétraitements ont permis d'améliorer la qualité des bandes et l'exploitation des images. Ainsi pour une mise en évidence des éléments caractéristiques de la zone étudiée et l'identification des zones de marais salants, les traitements suivants ont été appliqués :

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode basée sur le changement du référentiel des canaux multispectraux (variables brutes) dans un nouveau cadre de

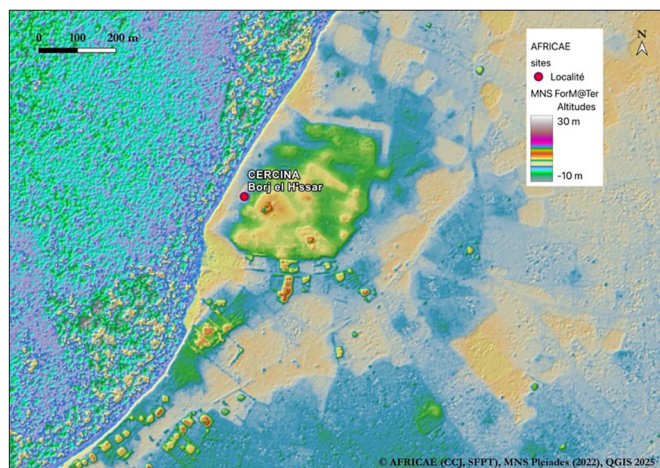


FIG. 3

Modèle numérique de surface (MNS) révélant la topographie détaillée et les limites de l'emprise urbaine de la ville antique de Cercina dans la zone de Borj El H'ssar. DAO : L. Lapierre (AFRICAE).

Digital Elevation Model (DEM) showing the detailed topography and the boundaries of the urban area of the ancient city of Cercina in the Borj el H'ssar area. CAD: L. Lapierre (AFRICAE).

référence de variables synthétiques (composantes principales) qui vise à maximiser (statistiquement) la quantité d'informations (ou variance) des données originales dans un nombre limité de composantes. Elle permet ainsi une meilleure corrélation des bandes (canaux) avec un maximum d'informations dans les trois premières composantes (Ratsimandresy, 2018). L'application de ce traitement sur les bandes d'images Pléiades permet de mettre en évidence des caractéristiques de la zone étudiée.

Le MNS représente l'altitude du sol ajoutée de celle des éléments situés au-dessus du sol, tels que les bâtiments et la végétation par exemple. Il a été obtenu via le service de calcul en ligne DSM-OPT, opéré par ForM@Ter (pôle Terre Solide) en collaboration avec THEIA (pôle Surface Continentales) et le dispositif DINAMIS. Le MNS a ainsi permis de mieux appréhender les caractéristiques topographiques de la zone d'étude en lien avec l'occupation du sol. Il a notamment contribué à définir les contours et le noyau urbain de la ville antique de *Cercina*, ainsi que le tracé de ce qui semble correspondre à son enceinte, nettement perceptible dans la topographie. Le MNS produit, ainsi que l'ensemble des données associées, ont donc été intégrés au projet AFRICAE, afin de documenter l'apport de ces nouvelles informations archéologiques inédites pour la communauté scientifique travaillant sur l'histoire et l'archéologie de l'Afrique du Nord antique (fig. 3). La cartographie locale élaborée avec la connaissance du trait de côte antique dans AFRICAE permettra de situer les activités exploitant les produits de la mer et sa cartographie générale apportant une lisibilité sur le contexte antique régional dans lequel les activités de *Cercina* se sont développées (www.chronocarto.eu/projet/africae/).

EXTRACTION DES TRAITS DE CÔTE POUR UN SUIVI DE L'ÉVOLUTION DU RIVAGE

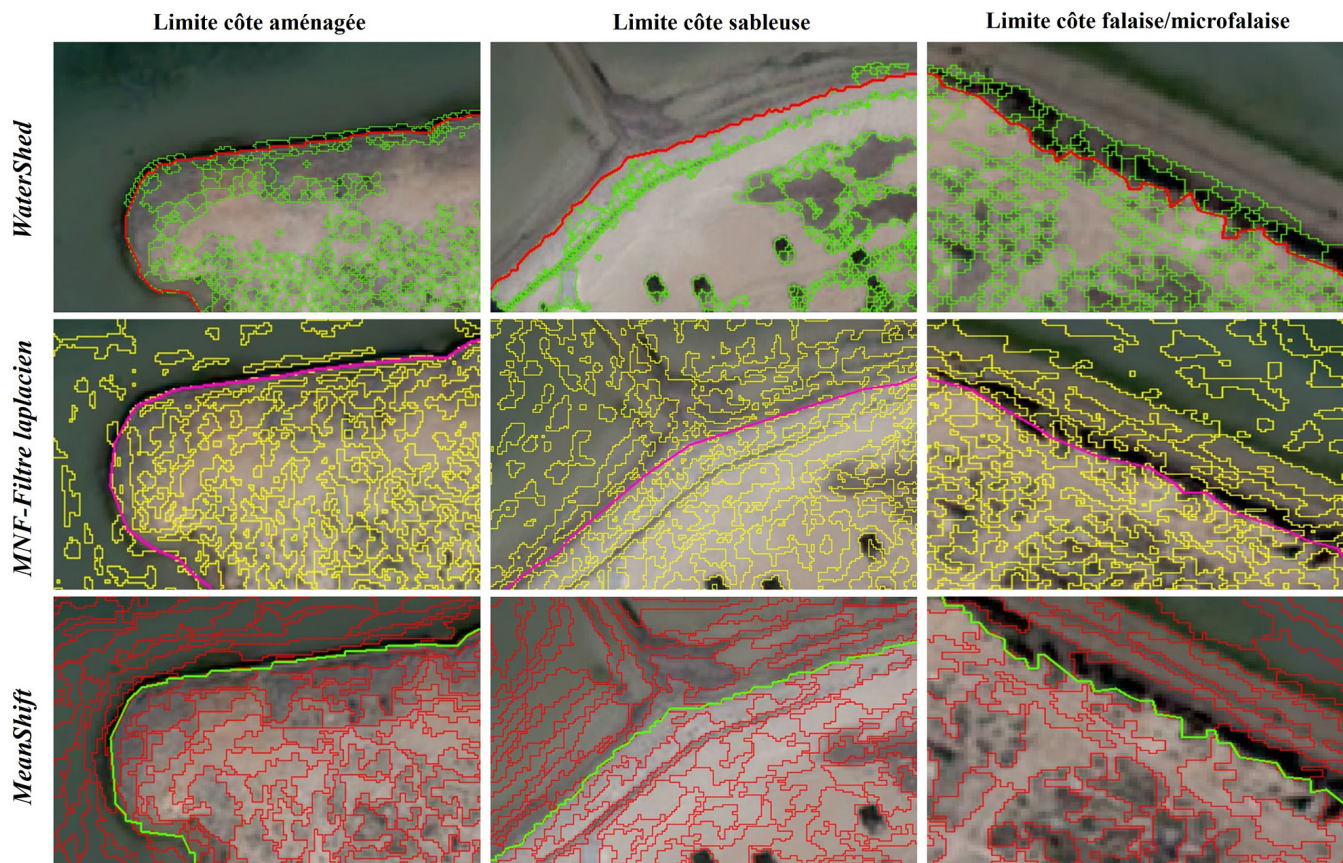
L'archipel de Kerkennah est confronté à un ensemble de phénomènes environnementaux, tels que la salinisation des terres, l'extension des sebkhas, l'érosion côtière, qui affectent directement le quotidien des populations locales. Parmi ces phénomènes, le recul du trait de côte constitue, depuis plus d'une décennie, le problème le plus grave que ressentent les habitants de l'archipel (Étienne *et al.*, 2015).

Le linéaire côtier étudié présente en effet plusieurs indices révélant une tendance au recul du rivage. Les observations de terrain mettent en évidence la présence de divers vestiges archéologiques sur l'estran, notamment des citernes éventrées ainsi que des blocs de citernes issus de l'éboulement de la falaise suite à l'érosion différentielle qui façonne ce littoral. Partant de ce constat et en considérant les études antérieures qui font état d'un recul généralisé du rivage dans l'archipel (Oueslati, 1995 ; Étienne, 2014 ; APAL, 2018), il s'avère nécessaire de quantifier l'évolution diachronique des positions du trait de côte le long du linéaire étudié. Pour ce faire, une méthode d'extraction des lignes de référence du trait de côte a été appliquée en fonction des différents types de côte qui caractérisent la zone d'étude : côte de falaise, côte basse sableuse et côte aménagée (Diatta *et al.*, 2025). Elle se fonde sur une comparaison de la performance d'algorithmes de segmentation *Watershed* et *Mean Shift*, ainsi qu'un algorithme de transformation d'image combinant MNF (Minimum Noise Fraction) et Filtre laplacien. La précision de ces techniques d'extraction du trait de côte a été évaluée par confrontation avec des lignes de référence numérisées, à partir des statistiques des indices NSM (Net Shoreline Movement), SCE (Shoreline Change Envelope) et EPR (End Point Rate) du module DSAS (Digital Shoreline Analysis System).

Les résultats ont montré que le *Watershed* est plus performant pour les côtes sableuses et urbanisées (écarts < 0,35 m), tandis que *Mean Shift* et la combinaison MNF-Filtre laplacien sont mieux adaptés aux secteurs à falaises (fig. 4).

Dans l'ensemble, la mise en place du protocole et la validation de ce processus ont permis la cartographie fine de la dynamique du secteur étudié, avec une tendance générale au recul du rivage. L'analyse diachronique (2012-2022) révèle ainsi un recul moyen de 0,33 m/an, particulièrement marqué au niveau de la plage du Grand Hôtel et autour de Borj El H'ssar. Cette dynamique confirme la vulnérabilité du littoral archéologique et souligne la nécessité de disposer d'outils de suivi fiables.

Dans cette perspective, les relevés photogrammétriques réalisés ont permis de créer une orthophotographie, offrant une représentation précise de la falaise (fig. 5C). Cette donnée renseigne ainsi sur l'état des vestiges archéologiques géoréférencés à un moment donné. Comparée à de futurs relevés ou à d'autres données géospatiales, elle permettra d'assurer un meilleur suivi de l'évolution du rivage et de mieux identifier les impacts du recul du trait de côte sur le patrimoine archéologique.

**FIG. 4**

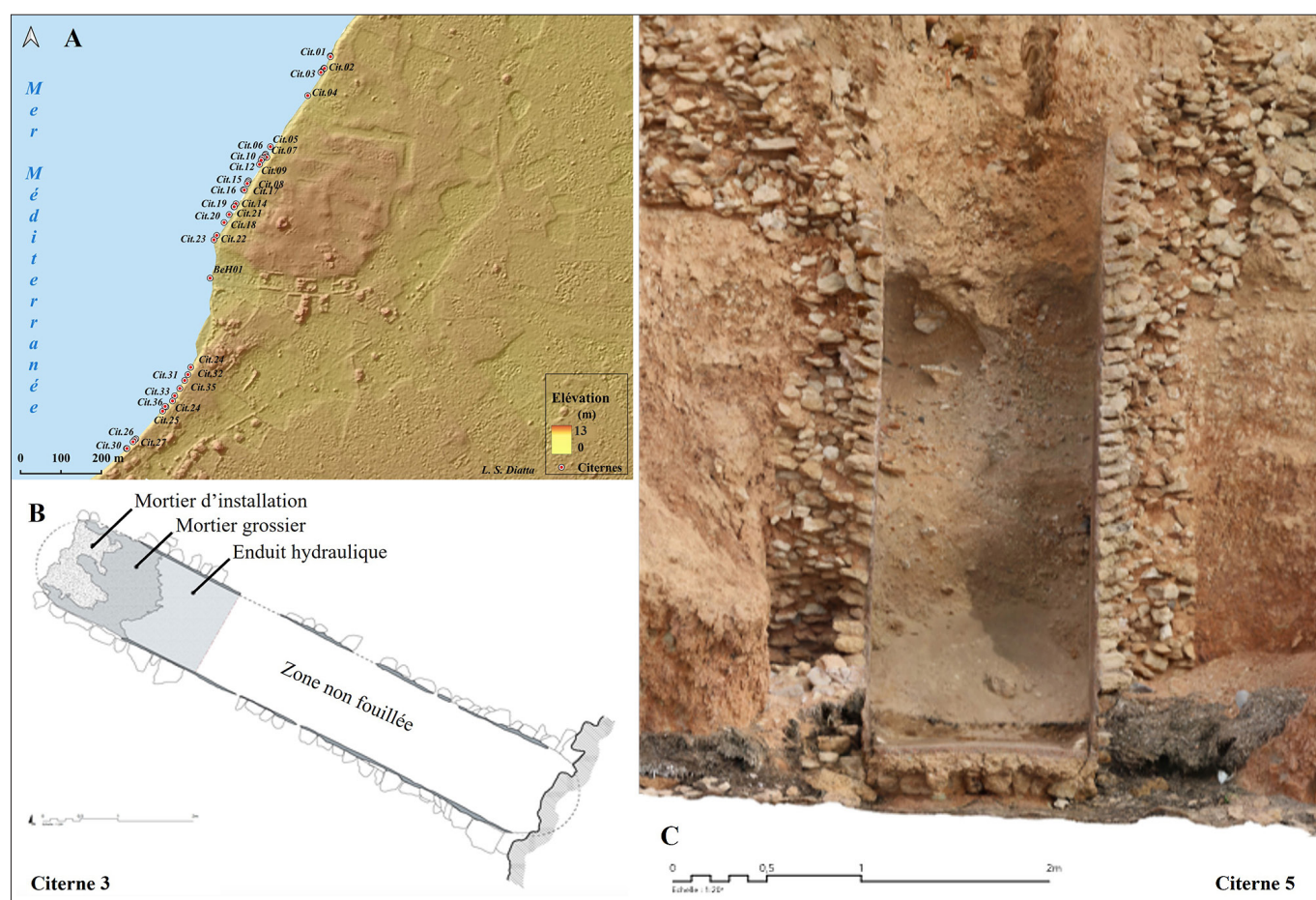
Catégorisation des objets et performance des différentes méthodes d'extraction appliquées en fonction des côtes qui caractérisent la zone d'étude (Diatta *et al.*, 2025).

*Classification of objects and performance of the various extraction methods applied, based on the topographical features of the study area (Diatta *et al.*, 2025).*

En outre, afin d'identifier et d'anticiper les vulnérabilités futures, une cartographie prospective de l'évolution du trait de côte à l'horizon 2044 a été réalisée, en s'appuyant sur les tendances d'évolution historique observées entre 1939, 1972, 2012, 2022 et 2024. Le choix d'une projection à moyen terme se justifie, d'une part, par l'ancienneté et l'intensification du phénomène d'érosion côtière. D'autre part, la forte exposition des enjeux, notamment les vestiges archéologiques ainsi que les installations humaines, conduit à privilégier une analyse à échéance intermédiaire plutôt que sur le long terme. L'évaluation à moyen terme apparaît donc comme l'échelle temporelle la plus pertinente pour ce cas d'étude, permettant d'identifier et de mettre en évidence les impacts futurs significatifs liés à la continuité d'une dynamique régressive de la ligne de rivage. Les résultats révèlent ainsi une érosion inquiétante, estimée à $3,4 \text{ m} \pm 0,8 \text{ m}$ à l'échéance 2044, qui concernerait la quasi-totalité du linéaire étudié, à l'exception des segments qui se caractérisent par la présence d'aménagements de protection, notamment le sud du site de Borj El H'ssar et le sud du Grand Hôtel. Cette projection à l'horizon 2044 repose sur l'hypothèse d'une continuation des dynamiques observées et ne prend pas en compte d'éventuels aménagements futurs, susceptibles de modifier la morphodynamique littorale.

De plus, à cet aléa d'érosion côtière, qui selon nos projections, devrait se poursuivre, s'ajoute le risque de submersion marine, auquel l'archipel est particulièrement exposé en raison de sa faiblesse topographique (Medail *et al.*, 2015). La vulnérabilité de l'archipel aux phénomènes de submersion a notamment été illustrée lors de l'épisode survenu entre les 26 et 27 novembre 2023, submergeant une grande partie des terres du village de Kraten, situé au nord de l'archipel. La submersion de ce village étant provoquée par la manifestation de vagues atteignant 1,02 m entre le 25 et le 27 novembre 2023 (source : données CMEMS).

Dans ce contexte, il nous est apparu nécessaire d'identifier les terres potentiellement submersibles, en tenant compte de l'élévation future du niveau de la mer. À cet effet, des scénarios d'élévations statiques du niveau marin de 0,5 m, 1 m et 2 m ont été retenus, correspondant respectivement aux horizons 2050, 2100 et 2124. Le choix de considérer des scénarios de forte élévation du niveau marin se justifie par la manifestation de phénomènes tectoniques à l'instar de la subsidence. En effet, certaines études suggèrent que les projections du GIEC sous-estiment l'élévation future du niveau marin le long des côtes de la mer Méditerranée, dans la mesure où les effets de la tectonique et d'autres facteurs locaux n'ont pas été correctement pris en compte (Vecchio *et al.*, 2024).

**FIG. 5**

Vestiges archéologiques identifiés et géoréférencés à Borj El H'ssar (A) ; relevé de la citerne 3 éventrée (B) et orthophoto de la coupe transversale de la citerne 5 (C). DAO : P. François, J. Seinturier.

Archaeological remains identified and georeferenced at Borj El H'ssar (A) ; survey of the exposed cistern 3 (B) and orthophoto of the cross-section of cistern 5 (C). CAD: P. François, J. Seinturier.

Ces choix d'analyse, ainsi que la méthodologie adoptée pour l'identification des terres potentiellement submersibles, sont expliqués plus en détail dans un article dans la revue *Méditerranée* (Diatta *et al.*, 2026).

Par ailleurs, au-delà de l'extraction du trait de côte et du suivi de son évolution, la modélisation globale d'un site littoral pose la question de l'intégration de données multi-modales (satellite, LiDAR, bathymétrie acoustique, photogrammétrie), aux résolutions hétérogènes et aux logiques de mesure distinctes. Ces enjeux méthodologiques, ainsi que leur formalisation dans un cadre opérationnel, sont développés dans l'article consacré au programme ATOLL, présenté dans ce même volume.

CONCLUSION

Initialement conçu pour un questionnement historique sur les temps longs, celui de l'importance du sel dans les sociétés passées et actuelles, le projet *Exploitation du sel d'hier à aujourd'hui : production, consommation et pratiques culturelles en Afrique du Nord* avec comme premier cas d'étude les îles Kerkennah s'est rapidement confronté à un besoin fondamental : celui d'une cartographie historique,

géographique, et archéologique qui s'appuyait sur une connaissance approfondie des dynamiques géomorphologiques locales expliquant et guidant nos interprétations archéologiques. Deux pistes s'en sont dégagées : l'une, que la localisation des côtes antiques devait être reconstituée afin d'y replacer toute activité d'exploitation des produits de la mer utilisant le sel marin (les bassins de salaisons notamment) ; l'autre, que sans étude de l'évolution du littoral ni de pronostic futur de la vitesse de destruction due à l'érosion côtière, nous n'étions pas à même de documenter, analyser puis interpréter efficacement les structures archéologiques en bordure de mer.

L'approche d'analyse appliquée au site de Borj El H'ssar, fondée sur la méthodologie présentée dans cet article, peut être transposable à d'autres sites, régions, territoires, voire au niveau d'un pays (Diatta, thèse en cours). Les résultats de cette étude, intégrant la mobilité récente, actuelle et future du trait de côte, prennent aussi en compte les évolutions sur le temps long, depuis l'Antiquité, d'où la collaboration avec le projet de cartographie collaborative de l'Afrique du Nord antique AFRICAÉ. Bien que le modèle soit toujours en cours d'évolution, le travail réalisé à Kerkennah constitue une base méthodologique que nous espérons développer sur d'autres cas d'étude, notamment dans le cadre des programmes

SEMPAT, AFRICAE et ATOLL. L'objectif est de contribuer à la protection des sites archéologiques, en proposant un outil d'analyse basé sur la compréhension et le suivi des mobilités récentes et futures du trait de côte, dans ce contexte marqué par une tendance à l'intensification de l'érosion différentielle à l'échelle locale, ce qui permettra de déduire des stratégies de protection adaptées pour le patrimoine archéologique, et fondées sur une analyse sérieuse des caractéristiques morphodynamiques et environnementales.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien de deux financements : la bourse Fyssen 2020 et le programme Amorce A*Midex

Recaliske (Reconstitution cartographique des dynamiques littorales et des structures anciennes au sein de l'archipel de Kerkennah, Tunisie), qui est une aide de l'État français dans le cadre du plan France 2030, au titre de l'Initiative d'Excellence d'Aix Marseille Université (AMIDEX), via l'Institut d'archéologie méditerranéenne ARKAIA (AMX-19-IET-003). Les auteurs les remercient, ainsi que l'Institut National du Patrimoine de Tunisie pour la délivrance des autorisations de travail sur le terrain, ainsi que l'Ambassade de France en Tunisie et le Musée du Patrimoine insulaire de Kerkennah pour leur soutien nous ayant également permis de former des étudiants tunisiens de l'Université de Sousse et de l'Université de Sfax.

Bibliographie

- APAL (2018).— *Carte géomorphologique et morphodynamique*. Feuille N° 108, Kerkennah, 2018, 15 p.
- BEN MUSTAPHA K. (2007).— Démosponges littorales des îles de Kerkennah (Tunisie). *Bulletin de l'Institut national des Sciences et Technologies de la Mer*, vol. 34, 2007, p. 37-59. <http://hdl.handle.net/1834/4208>
- BROODBANK C., LUCARINI G. (2020).— *The Dynamics of Mediterranean Africa, ca. 9600–1000 BC: An Interpretative Synthesis of Knowns and Unknowns*, 2020. <https://doi.org/10.17863/CAM.49028>
- DIATTA L. S. (2022).— *Archéologie des littoraux dynamiques et géomatique : le cas de l'archipel de Kerkennah*. Mémoire de Master, Aix Marseille Université, 2022, 82 p.
- DIATTA L. S. (en cours).— *Approches SIG, géomatique et géo-archéologie littorale en Tunisie. Étude de cas : le delta de la Majerda, le secteur côtier entre Hergla-Salloum et l'archipel de Kerkennah*. Thèse de doctorat en géographie. Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence, France.
- DIATTA L. S., SCHÖRLE K., AKACHA Z., BETTAIEB S., DRINE A., OUESLATI A., LAPIERRE L. (2025).— Performance of segmentation (watershed and meanshift) and image transformation (MNF-laplacian filter) methods for extracting complex coastlines from Pleiades images: the case of the Kerkena archipelago, Tunisia. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 2025, <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1542241>
- DIATTA L. S., SCHÖRLE K., BETTAIEB S., MENDY L. P., OUESLATI A., LAPIERRE L. (2026).— Synthèse des dynamiques anciennes et analyse spatio-temporelle des modifications récentes, actuelles et futures de la ligne de rivage dans le delta de la Majerda, Tunisie. *Méditerranée*, 2026, <https://doi.org/10.4000/165j9>
- ÉTIENNE L. (2014).— *Accentuation récente de la vulnérabilité liée à la mobilité du trait de côte et à la salinisation des sols dans l'archipel de Kerkennah (Tunisie)*. Thèse de doctorat en géographie, Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité ; Université de Sfax, 2014, 360 p.
- ÉTIENNE L., DAOUD. A., BELTRANDO G. (2015).— *Salinisation des sols et extensions des sebkhas sur l'archipel de Kerkennah depuis 1969*. Symposium international, Kerkennah, 2015, p. 105-110.
- MAHFOUDH F. (2000).— L'archipel de Kerkéna au Moyen Âge d'après les géographes arabes et les données archéologiques. In : *L'Africa romana*, XIII. Djerba, 10-13 décembre 1998, Rome, Carocci, 2000, p. 649-677.
- OUESLATI A. (1995).— *Les îles de la Tunisie : paysages et milieux naturels. Genèse, évolution et aptitude à l'aménagement d'après les repères de la géomorphologie, de l'archéologie et de l'occupation humaine récente*. Tunis, Éd. Cérès, n°10, public. Université de Tunis, 1995, 368 p.
- OUESLATI A. (2022).— The lower coasts of the Gulf of Gabès and their wetlands (South-East Tunisia): a geoarchaeological study of the landscape evolution and human occupation in Late Holocene. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 63, 2022, p. 343-363. <https://doi.org/10.1127/zfg/2021/0716>
- RATSIMANDRESY R. N. (2018).— *Analyse du potentiel de l'image satellite Sentinel-2 à la caractérisation des reboisements villageois de la commune rurale de Tsiarafahy, région Analamanga*. Mémoire de Master, Université d'Antananarivo, 2018, 78 p.
- SCHÖRLE K., DRINE A., BASUAU N., BETTAIEB S., CARAYON N., DAHMANI R., DIATTA L., FRANÇOIS P., KRIDA R., LAPIERRE L., OTHMANN A., SELMI N., ZARROUCK W. (2023).— *L'exploitation du sel d'hier à aujourd'hui : production, consommation et pratiques culturelles. Archéologie, évolution du paysage, spatialisation et marqueurs chimiques du sel dans les îles Kerkennah (Tunisie)*. Rapport d'activités 2021-2022. Aix-en-Provence, CNRS, 2023.
- SCHÖRLE K., DRINE A., SEINTURIER J., FRANÇOIS P., OLLIVIER D., SOUBIAS P., MOUSTAPHA S., KRIDA R., DIATTA L. et al. (2024).— *L'exploitation du sel d'hier à aujourd'hui : production, consommation et pratiques culturelles. Archéologie, évolution du paysage, spatialisation et marqueurs chimiques du sel dans les îles Kerkennah (Tunisie)*. Rapport d'activités 2023. Aix-en-Provence, CNRS, 2024.