

# RAPPORT

## *Effets du changement climatique sur le patrimoine culturel: la contribution de la photogrammétrie numérique au suivi des sites menacés*

**Elías López-Romero**

*Avec la collaboration de:*

**Marie-Yvane Daire, Laurent Quesnel et Juan Mencía**



## **Table des Matières**

1. INTRODUCTION.....	5
2. RAPPEL DES OBJECTIFS ET MÉTHODES DU PROJET.....	6
3. RÉALISATION DES TRAVAUX.....	7
3.1. Réunions de préparation.....	7
3.2. Travail de terrain.....	8
3.3. Création d'un environnement SIG pour l'analyse géographique des données.....	10
3.4. Modélisation préliminaire des données : photogrammétrie.....	12
3.5. Résultats préliminaires.....	13
4. VALORISATION.....	13
5. JUSTIFICATION DES DÉPENSES.....	15
6. CONCLUSIONS.....	17
BIBLIOGRAPHIE CITÉE.....	18
ANNEXE : Pièces justificatives.....	19



## **1. INTRODUCTION**

Les paysages côtiers sont des espaces uniques soumis à une évolution et à des changements intenses. À l'heure actuelle, l'élévation du niveau de la mer est l'un des effets visibles du changement climatique, et l'activité humaine menace également de nombreux territoires côtiers et insulaires à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, la vulnérabilité du patrimoine côtier est de plus en plus mise en évidence, en particulier dans des zones telles que la façade atlantique européenne, où les résultats combinés de l'élévation du niveau de la mer, de la dynamique de l'environnement côtier et de l'activité humaine modifient considérablement le littoral.

En Europe, les archéologues écossais ont été parmi les premiers à alerter sur la menace qui pèse sur ce patrimoine (Ashmore 1994). Dans l'ouest de la France, les estimations actuelles indiquent que plus de 2500 sites archéologiques sont gravement menacés (Daire et López-Romero 2008 ; Daire et al. 2012 ; López-Romero et al. 2013). La nécessité d'une meilleure connaissance de ce patrimoine, de son cadre et de sa vulnérabilité devient ainsi de plus en plus urgente (cf. Erlandson 2008).

En ce contexte, le projet *"Effets du changement climatique sur le patrimoine culturel: la contribution de la photogrammétrie numérique au suivi des sites menacés"* s'encadre dans la collaboration d'Elías López-Romero (IAM-CSIC) avec l'UMR6566 CReAAH (Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire)<sup>1</sup> sur l'archéologie de la façade atlantique de l'Europe et les effets du changement climatique sur le patrimoine culturel et archéologique. Le projet se situe dans la continuité des programmes ALeRT<sup>2</sup> (2006-présent) et ALOA<sup>3</sup> (2018-présent), co-portés par Marie-Yvane Daire (Directrice de Recherche CNRS et directrice de l'UMR6566 CReAAH) et Elías López-Romero (Científico Titular, IAM-CSIC), ainsi que du projet eSCOPES<sup>4</sup> (2013-2015), porté par E. López-Romero et dont le CReAAH était partenaire. Les deux chercheurs ont également co-porté un projet de collaboration bilatérale CNRS-CSIC en 2011 (*Archéologie Littorale et vulnérabilité: une approche inter-régionale Bretagne - Galice*).

<sup>1</sup><https://creaah.cnrs.fr/>

<sup>2</sup><https://alert-archeo.org/>

<sup>3</sup><https://aloea.blog/>

<sup>4</sup><https://www.durham.ac.uk/departments/academic/archaeology/research/archaeology-research-projects/escopes/>

## **2. RAPPEL DES OBJECTIFS ET MÉTHODES DU PROJET**

L'AAP scientifiques de l'Ambassade de France en Espagne a permis de développer une nouvelle initiative dans le cadre des collaborations citées ci-dessus. Le monument préhistorique (époque néolithique) de l'île de Coalen (Lanmodez, Côtes-d'Armor) est l'un des meilleurs exemples des menaces qui pèsent sur le patrimoine culturel de la France (Figure 1). Soumis au régime des marées et exploité à une époque historique indéterminée pour l'obtention de matières premières pour la construction (traces de carriers présentes sur certains blocs du monument), le site est classé au titre des monuments historiques en 1975<sup>5</sup>.



Figure 1 - L'allée couverte néolithique de Coalen sur la commune de Lanmodez (Côtes-d'Armor)(cl. E. López-Romero).

L'objectif principal du projet était d'obtenir un relevé précis de ce site, permettant à terme de réaliser un modèle 3D de précision par photogrammétrie numérique (modélisation 3D à partir d'une série de photographies à haute résolution). Le site avait déjà fait l'objet d'un enregistrement numérique

<sup>5</sup><https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/PA00089257>

en 2013 et 2014 par les membres de l'équipe (López-Romero et al. 2014 ; 2016). Avec ce nouveau modèle, l'objectif ultime est d'évaluer -par comparaison des différents modèles numériques obtenus (2013, 2014 et actuel)- l'état d'altération du site : altérations des sédiments et des niveaux archéologiques, déplacement d'éléments architecturaux.

Pour arriver à ces fins, les équipes partenaires disposaient en amont des équipements et logiciels qui permettront de mener à bien l'ensemble de ces études (GPS de précision, appareils photographiques, logiciels SIG et photogrammétriques).

Tel qu'il avait été prévu dans le texte de la demande de financement de l'AAP, la subvention a été utilisée pour permettre la mobilité vers la France du porteur espagnol du projet et réaliser le relevé.

### **3. RÉALISATION DES TRAVAUX**

Les travaux ont été réalisés en différentes étapes, en laboratoire et sur le terrain.

Ont participé aux travaux : E. López-Romero (Científico Titular, IAM-CSIC), Marie-Yvane Daire (Directrice de Recherche CNRS et directrice de l'UMR6566 CReAAH), Laurent Quesnel (Ingénieur d'Études, UMR6566 CReAAH), Juan Mencía (Contratado programa Yo Investigo, IAM-CSIC), avec support administratif des gestionnaires du CSIC (siège des unités de gestion économique et voyages au CCHS-CSIC à Madrid)<sup>6</sup>.

#### ***3.1. Réunions de préparation***

Une première réunion en visioconférence eut lieu le 18 août entre E. López-Romero et M-Y. Daire suite à l'annonce du financement du projet. Dans cette réunion, il fut accordé que le déplacement en Bretagne du porteur espagnol du projet aurait lieu au cours de la première quinzaine du mois d'octobre.

À cause des délais dus à la mise à disposition tardive des fonds par les gestionnaires du CCHS-CSIC, le travail en Bretagne eut finalement lieu la semaine du 24 au 28 octobre 2022.

<sup>6</sup><http://www.cchs.csic.es/>

Du 24 au 26 octobre, des réunions dans les locaux de l'UMR CReAAH à Rennes permirent de préciser le planning des travaux et des analyses numériques liées au projet, ainsi que de préparer la journée de terrain, qui eut lieu le jeudi 27 octobre.

### **3.2. Travail de terrain**

Le travail de terrain sur l'île Coalen (Lanmodez, Côtes d'Armor) fut réalisé par E. López-Romero, M.-Y. Daire et L. Quesnel.

Les frais de déplacement (véhicule) entre Rennes et Lanmodez furent assurés par le CReAAH.

L'île est accessible à pied à marée basse. Compte tenu des horaires et des coefficients de marée pour la journée du 27 octobre, une "fenêtre" de travail fut possible entre c. 12h30 et 17h30.

#### *3.2.1. Équipements*

Pour l'obtention d'un modèle photogrammétrique de précision et géo-référencé, les équipements suivants furent utilisés :

- Appareil photographique reflex Canon EOS 700D (E. López-Romero).
- GPS de précision Trimble R10 (récepteur de base + récepteur mobile)(UMR6566 CReAAH).
- Perche (pour la prise de photographies en hauteur)(UMR6566 CReAAH).
- Cibles photogrammétriques créées avec le logiciel Agisoft Metashape Professionnel (E. López-Romero).

#### *3.2.2. Protocole de travail*

Le travail a suivi un protocole bien établi, qui consiste à :

- placer des cibles photogrammétriques autour de la zone d'intérêt (site archéologique; **Figure 2**) ;
- réaliser des séries très complètes de photographies de l'ensemble (superposition des clichés nécessaire) ;
- enregistrer les coordonnées exactes des cibles à l'aide de l'appareil topographique (GPS).



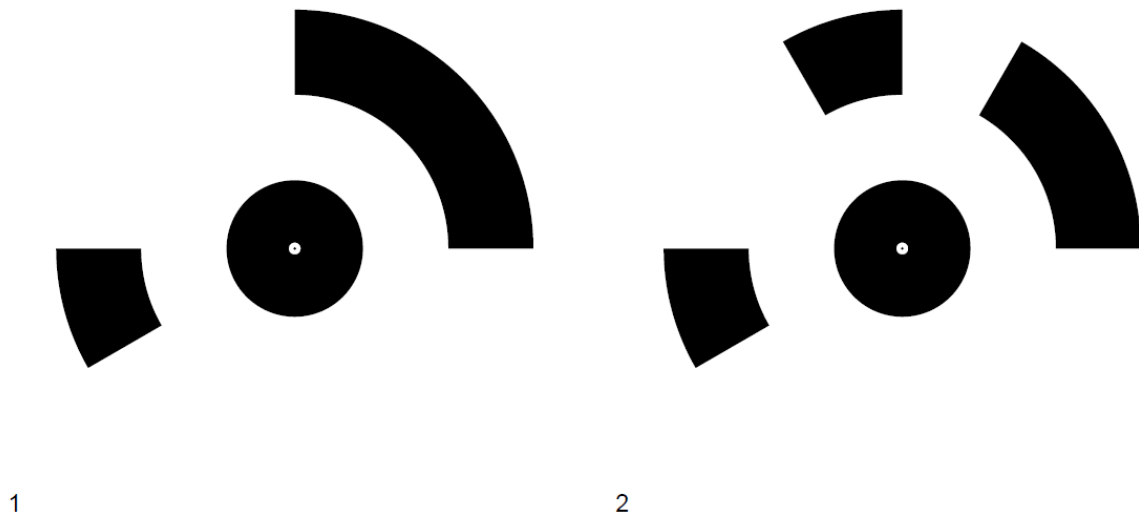


Figure 2 - Cibles photogrammétriques créées sous Agisoft Metashape (E. López-Romero).

Les photographies ont été prises (i) au sol et (ii) à l'aide d'une perche, pour avoir une couverture totale du site archéologique (Figure 3 et 4).



Figure 3 - Prise de photographies au sol (cl. MY. Daire).



Figure 4 - Prise de photographies à l'aide d'une perche (cl. MY. Daire).

Un total de 1017 images fut ainsi obtenu. 64 cibles photogrammétriques furent enregistrées par GPS pour le géoréférencement des images.

### ***3.3. Création d'un environnement SIG pour l'analyse géographique des données***

Une fois de retour en Espagne, un environnement SIG (Système d'Information Géographique) sous le logiciel libre QGIS fut créé en laboratoire pour l'intégration géographique de l'ensemble des données du projet (Figure 5 et 6).

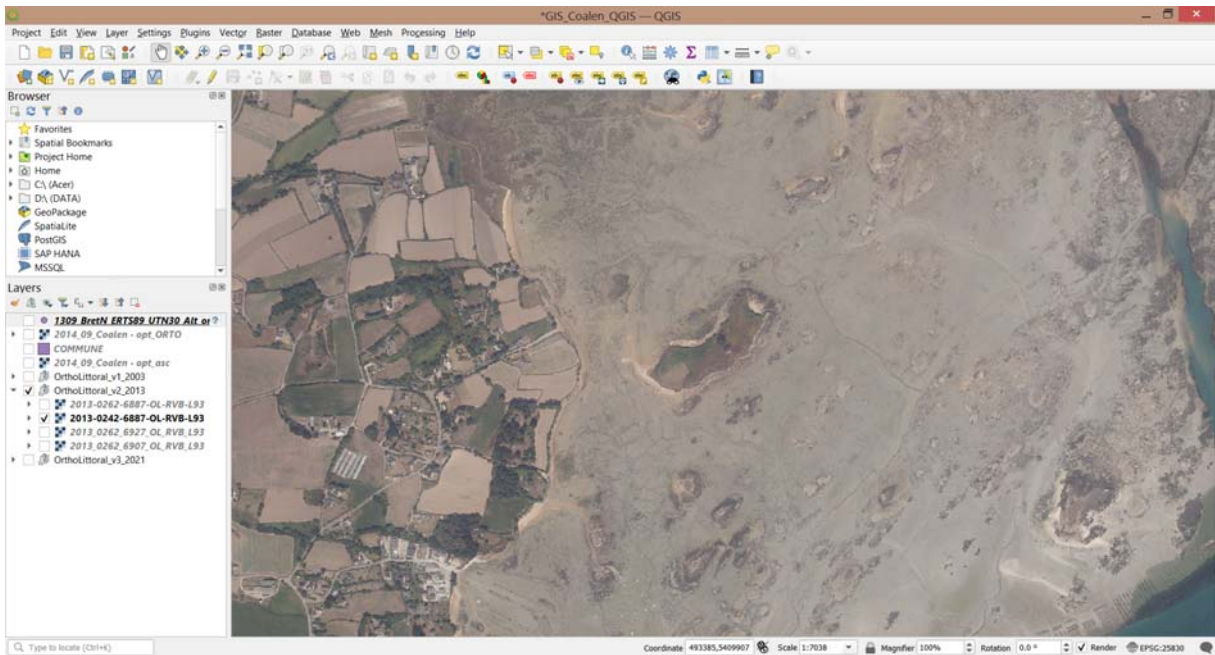


Figure 5 - Environnement SIG sous le logiciel QGIS, avec intégration des orthophotographies de l'IGN (OrthoLittoral)(E. López-Romero)

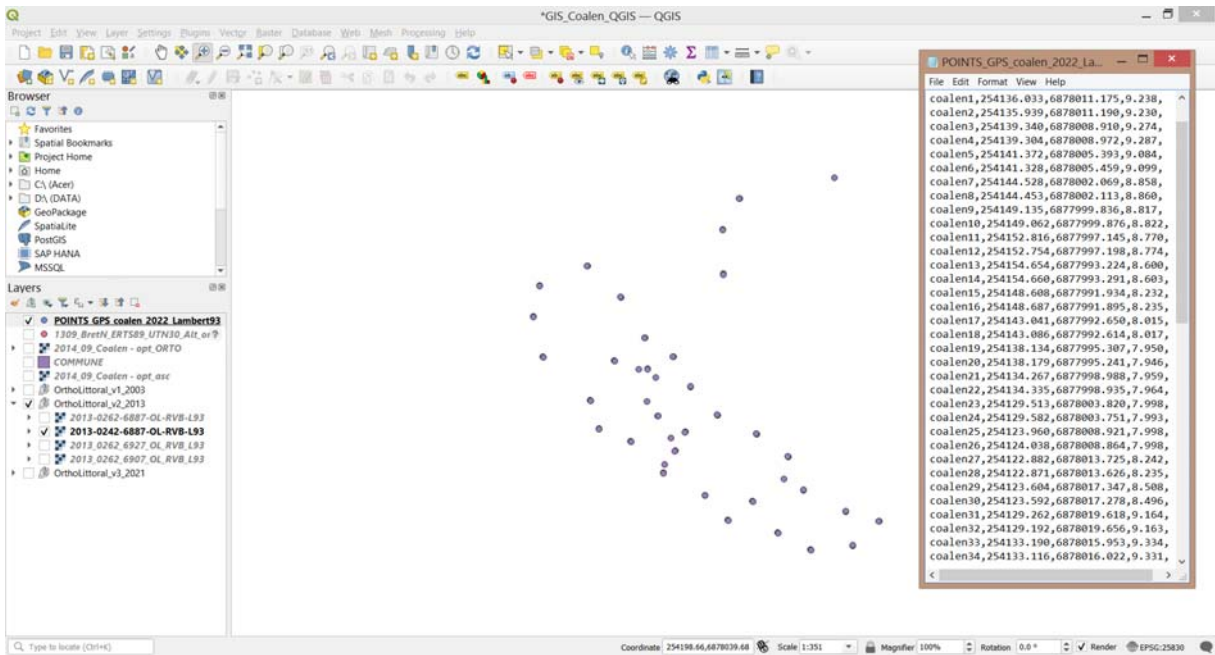


Figure 6 - Liste et position GPS des cibles photogrammétriques sous le logiciel QGIS. Coordonnées Lambert93 (E. López-Romero & L. Quesnel)

### 3.4. Modélisation préliminaire des données : photogrammétrie

Les images ont été par par la suite intégrées au logiciel d'analyse photogrammétrique Agisoft Metashape<sup>7</sup>. Les calculs sont réalisés sur un ordinateur Acer Aspire V3-771G, équipée d'un processeur Intel® Core™ i7-3632QM 2.2GHz et une carte graphique NVIDIA® GeForce® GTX 730M.

La séquence de travail sous ce logiciel Agisoft Metashape est la suivante:

- Alignement des images (position des caméras)(Figure 7)
- Construction d'un nuage de points dense
- Construction d'un modèle 3D
- Positionnement des cibles sur le modèle
- Attribution de coordonnées aux cibles
- Re-calcul du modèle

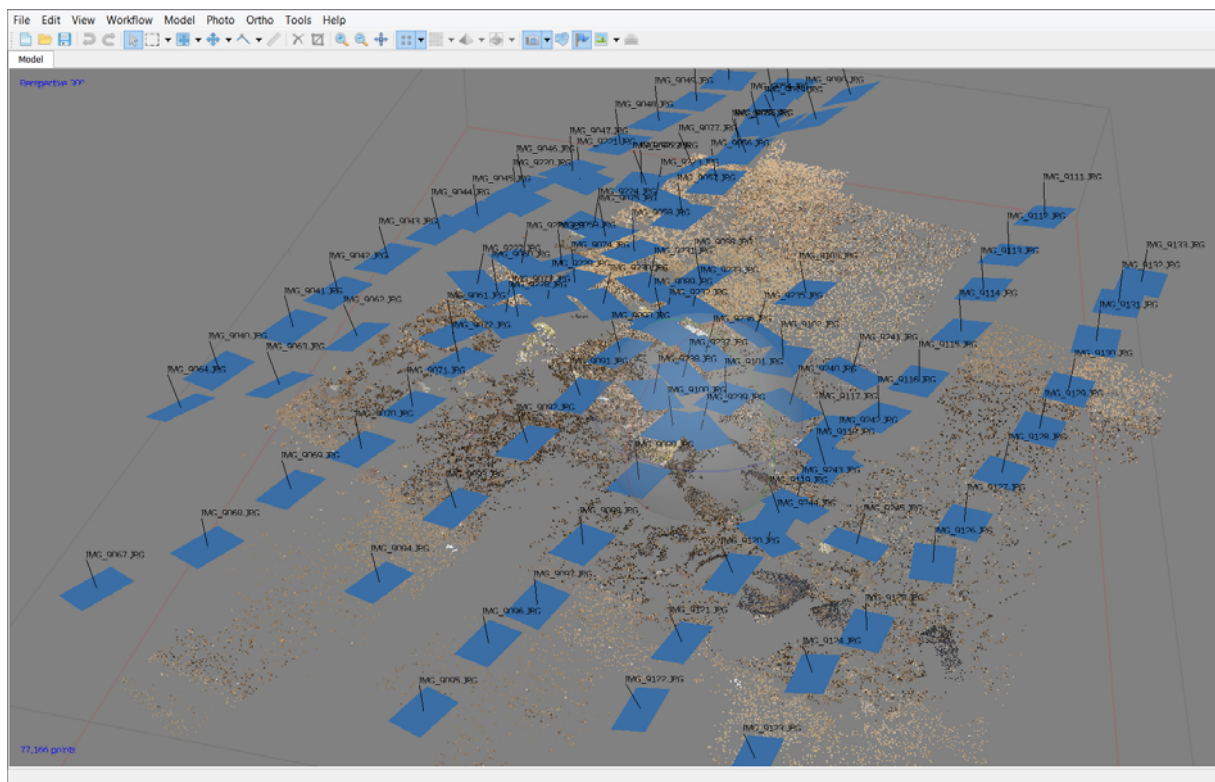


Figure 7 - Alignement des images sous Agisoft Metashape, avec position des caméras. Pour la lisibilité de l'image, seul 186 images /caméras ont été utilisées pour cette figure (E. López-Romero & J. Mencía)

<sup>7</sup><https://www.agisoft.com/>

Les coordonnées ont été enregistrées au format Lambert93. Elles seront transformées au format ETRS89/UTM30N/EPSSG:25830 pour être compatibles avec les modèles obtenus en 2013 et 2014.

### **3.5. Résultats préliminaires**

L'analyse de l'ensemble des données et la création du modèle photogrammétrique 3D de précision est une procédure longue qui nécessite de la vérification de la précision du modèle, de l'élimination des clichés de moins bonne qualité, du géoréférencement et du re-calcul de l'ensemble de la modélisation<sup>8</sup>. Cette procédure doit se répéter plusieurs fois jusqu'à l'obtention de la qualité souhaitée, un travail qui est actuellement en cours. C'est ce modèle définitif qui permettra par la suite la comparaison avec les modèles obtenus lors du travail des années 2013 et 2014 sur ce même site archéologique. L'obtention du modèle préliminaire témoigne du succès de l'opération - couverture globale du site archéologique ; photographies de qualité ; positions GPS des cibles photogrammétriques correctement enregistrées ; alignement correct des clichés sous le logiciel Agisoft Metashape ; nuage de points dense ; modèle 3D sans lacunes-.

Le travail de relevé pour lequel le financement de l'Ambassade de France en Espagne a été sollicité (déplacement du porteur espagnol en France) a donc été un succès.

## **4. VALORISATION**

L'information sur le projet a été intégrée au site web de l'Instituto de Arqueología de Mérida (**Figure 8**). La mention au financement "Appel à projets scientifiques de l'Ambassade de France en Espagne au titre de l'année 2022 – chercheurs confirmés" est explicite, et un lien vers le site web de l'Ambassade de France en Espagne y a été ajouté<sup>9</sup>.

De la même façon, le financement et des informations sur l'état d'avancement du projet ont été publiés sur les réseaux sociaux de l'Instituto de Arqueología de Mérida, toujours avec mention au financement de la part de l'Ambassade.

<sup>8</sup>Rien que l'alignement des plus de 1000 images pour le calcul d'un modèle préliminaire à la plus basse résolution prend plus de 5h.

<sup>9</sup><https://es.ambafrence.org/-Espanol->

Les résultats du projet feront également l'objet d'au moins une publication dans une revue scientifique internationale d'impact (probablement *Journal of Archaeological Science: Reports*)<sup>10</sup>, prévisiblement courant 2023.

**instituto  
arqueología  
mérida**

Logo of the Spanish Government, CSIC, and Junta de Extremadura.

Inicio Presentación Contacto Personal Investigación Agenda científica Publicaciones Enlaces Unidad de Servicios

Investigación > Proyectos > Efectos del cambio climático sobre el patrimon...

**Efectos del cambio climático sobre el patrimonio cultural: la contribución de la fotogrametría digital al seguimiento de yacimientos amenazados (Effets du changement climatique sur le patrimoine culturel: la contribution de la photogrammétrie numérique au suivi des sites menacés). INVESTIGADOR PRINCIPAL: Elías López-Romero González de la Aleja**

El proyecto tiene por objetivo específico el estudio de las modificaciones sufridas por el dolmen de época neolítica de la isla de Coalén (Lanmodez, Bretaña, Francia) como consecuencia de la subida del nivel del mar y los efectos del cambio climático actual. Este yacimiento fue objeto de un seguimiento y registro digital en 2013 y 2014 en el marco del proyecto europeo Marie Curie "eSCOPES" (FP7-PEOPLE-2012-IEF 328753, Investigador principal Elías López-Romero). Gracias a la financiación obtenida por medio de la convocatoria científica 2022 «Investigadores confirmados» de la Embajada de Francia en España, será posible realizar un estudio actualizado por medio de fotogrametría digital de este monumento prehistórico.

Además de evaluar posibles actuaciones futuras en función del estado de alteración del yacimiento, los resultados contribuirán al debate sobre las soluciones que las ciencias humanas y sociales pueden aportar a los efectos del cambio climático sobre el patrimonio (en concreto, sobre yacimientos arqueológicos y paisajes culturales). El proyecto cuenta con la participación de la Unidad Mixta de Investigación UMR CReAAH, con sede central en Rennes (Francia), y se enmarca en la colaboración que los equipos español y francés desarrollan sobre esta temática desde hace casi dos décadas (véanse por ejemplo los programas ALeRT, eSCOPES, ALOA e IMPACT).

Instituto de Arqueología-Mérida (IAM) - Aviso Legal | Política de Cookies | Hecho con biPanel

CSIC JUNTA DE EXTREMADURA Unión Europea Fondo Europeo de Desarrollo Regional "Una manera de hacer Europa"

Figure 8 - Site web de l'Instituto de Arqueología de Mérida, avec information sur le projet.

<sup>10</sup><https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-archaeological-science-reports>

## 5. JUSTIFICATION DES DÉPENSES

L'aide de l'"Appel à projets scientifiques de l'Ambassade de France en Espagne au titre de l'année 2022 – chercheurs confirmés" a permis le déplacement du porteur espagnol du projet en France.

Une fois l'aide versée à l'organisme de rattachement du porteur du projet (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), la procédure habituelle pour l'engagement des dépenses au sein de cet organisme a été suivie.

L'Instituto de Arqueología de Mérida dépend administrativement du CCHS (Centro de Ciencias Humanas y Sociales), siégré à Madrid.

Pour la gestion financière du projet, on a donc fait appel aux unités internes responsables à ce sujet : l'*Unidad de captación de recursos y gestión de proyectos, contratos de investigación y convenios*<sup>11</sup> et l'*Unidad de gestión económica y comisiones de servicio*<sup>12</sup>.

Les frais des repas (*dietas de manutención*) sont remboursés à l'agent au taux forfaitaire de 65,51 €/jour complet (séjour en France, agents du Groupe 2)<sup>13</sup>. Cet argent est donc avancé par l'agent sur place et uniquement remboursé après calcul et validation par l'*Unidad de gestión económica y comisiones de servicio*.

L'achat des billets de transport a été faite -comme il est obligatoire dans l'organisme- par l'intermédiaire de l'agence BDC-Travel<sup>14</sup>.

Compte tenu du prix total des billets de transport (train et avion) et des frais des repas (*dietas de manutención*) sur la durée du séjour en France du porteur espagnol du projet, aucun frais d'hôtel n'a été ajouté car on aurait largement dépassé les 1000€ de l'aide accordée. L'hébergement du porteur du projet a finalement été assuré gracieusement chez des collègues de l'UMR CReAAH.

Au moment de la rédaction de ce rapport les différentes dépenses n'étaient pas actualisées sur le site de gestion du CSIC auquel le porteur du projet a accès. Pour toute question à ce sujet merci de contacter les Unités responsables au CCHS (information de contact dans les liens citées en bas de page).

<sup>11</sup><http://cchs.csic.es/es/service-unit/unidad-captacion-recursos-gestion-proyectos-contratos-investigacion-convenios>

<sup>12</sup><http://cchs.csic.es/es/service-unit/unidad-gestion-economica-comisiones-servicio>

<sup>13</sup>Real Decreto 462/2002, de 24 de mayo, sobre indemnizaciones por razón del servicio

<sup>14</sup><https://age.bcdtravel.es/age/>

Le tableau ci-dessous résume donc les frais engagés, à défaut du montant exact du remboursement des frais des repas (*dietas de manutención*) et des honoraires exacts de l'agence de voyages concernant notamment les billets d'avion. Des copies des justificatifs de la réalisation du voyage (copies des billets, cartes d'embarquement, etc.) se trouvent dans l'Annexe I à la fin de ce rapport.

Nature de la dépense	Détail	Montant	Commentaires
Transports	Train Mérida-Madrid	47,40€	
	Avion A/R Madrid-Paris CDG	359.38 + Service FEE	Prix au moment de l'offre par BDC-Travel. Prix des honoraires "Service FEE" non communiqué à l'agent.
	Train Aéroport Paris CDG-Rennes	63€	
	Train Rennes-Paris Montparnasse	90€	
	Taxi Paris Montparnasse-Aéroport Paris CDG	65,51€	
	Train Madrid-Mérida	0€	Billet obtenu gratuitement par l'agent ( <i>abono de fidelización</i> ). Aucun frais n'est chargé au projet
Repas ( <i>dietas de manutención</i> )	65,51€/jour complet x 5 jours	327,55€	Montant estimé, en attente du calcul de l' <i>Unidad de gestión económica y comisiones de servicio</i>
<b>Total des dépenses</b>		<b>952,84€</b>	

Tableau 1 - État des dépenses du projet



## **6. CONCLUSIONS**

Le financement du projet "Effets du changement climatique sur le patrimoine culturel: la contribution de la photogrammétrie numérique au suivi des sites menacés" via l'*Appel à projets scientifiques de l'Ambassade de France en Espagne au titre de l'année 2022 – chercheurs confirmés* a permis de réaliser un relevé détaillé de l'allée couverte préhistorique de Coalen (Lanmodez, Côtes d'Armor). Ce monument funéraire d'époque néolithique est l'un des meilleurs exemples de la remontée du niveau marin et des menaces qui pèsent sur le patrimoine culturel et archéologique de la France et, par extension, de l'Europe atlantique.

Les données obtenues grâce à ce projet sont en train d'être analysées en détail. Les procédures pour ce type d'étude sont longues, mais les analyses d'ores et déjà réalisées sur l'ensemble des données acquises confirment la précision des relevés GPS et la qualité des photographies obtenues.

Cette analyse permettra à terme d'évaluer les altérations subies récemment par ce site archéologique, contribuant au débat sur les solutions que les Sciences humaines et sociales (i.e. l'archéologie et l'application des méthodes d'analyse numérique) peuvent apporter à la question des menaces et adaptations aux conséquences du changement climatique. En ce contexte, les équipes partenaires plaident pour une perspective de "préservation par l'étude", qui permette de sauver des informations scientifiques de sites et monuments qui seront, à terme, détruits par l'érosion. Le modèle numérique 3D résultant du travail financé par l'AAP constitue une "instantanée" de l'état de ce site archéologique en octobre 2022. En cas de destruction totale ou partielle du site, ce modèle pourra se présenter comme un élément d'étude alternative du monument préhistorique.

## BIBLIOGRAPHIE CITÉE

ASHMORE, P. 1994. Archaeology and the coastal zone: toward a Historic Scotland policy. Edinburgh: Historic Scotland.

DAIRE, M-Y., LÓPEZ-ROMERO, E., 2008 – Des sites archéologiques en danger sur le littoral et les îles de Bretagne », *Bulletin de l'A.M.A.R.A.I.*, 21, p. 91-104.

DAIRE M.-Y., LÓPEZ-ROMERO E., PROUST J.-N., REGNAULD H., PIAN S., 2012 – Coastal Changes and Cultural Heritage (1): Assessment of the Vulnerability of the Coastal Heritage in Western France, *Journal of Island and Coastal archaeology*, 7, p. 168-182.

ERLANDSON, J.M. 2008. Racing a rising tide: global warming, rising seas and the erosion of human history. *Journal of Island and Coastal Archaeology* 3: 167–69. <http://dx.doi.org/10.1080/15564890802436766>

LÓPEZ-ROMERO, E., MAÑANA-BORRAZÁS, P., GÜIMIL-FARIÑA, A., DAIRE, M.-Y., 2016 – Archaeology and Coastal erosion: Monitoring change through 3D digital techniques. In Kamermans H., De Neef W., Piccoli C., Posluschny A., Scopigno R., *The three dimensions of Archaeology*. Proceedings of the XVII UISPP World Congress, 89 – 97, Archaeopress, Oxford.

LÓPEZ-ROMERO, E., DAIRE, M.-Y., PROUST, J.-N., REGNAULD, H., 2013 – Le projet ALeRT : une analyse de la vulnérabilité du patrimoine culturel côtier dans l'Ouest de la France, In : Daire M.-Y., Dupont C., Baudry A., Billard C., Large J.-M., Lespez L., Normand E., Scarre. C. (dir.), *Ancient maritime communities and the relationship between people and environment along the European Atlantic coasts / Anciens peuplements littoraux et relations homme/milieu sur les côtes de l'Europe atlantique*, *Proceedings of the HOMER 2011 Conference, Actes du colloque HOMER 2011*, (Vannes, 28 septembre-1er octobre 2011). Oxford Ed. Archaeopress (British Archaeological Reports International Series 2570), p. 127-136.

LÓPEZ-ROMERO, E., MAÑANA-BORRAZÁS, P., DAIRE M.-Y., GÜIMIL-FARIÑA A., 2014 – The eSCOPES Project: Preservation by record and monitoring at-risk coastal archaeological sites on European Atlantic Façade, *Antiquity* (Project Gallery) 088(339) <http://antiquity.ac.uk/projgall/lopez-romero339/>