



**HAL**  
open science

## Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021)

Thierry Lucas, Jesús García Sánchez

► **To cite this version:**

Thierry Lucas, Jesús García Sánchez. Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021). Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger, 2022, 10.4000/baefe.6404 . hal-03723671

**HAL Id: hal-03723671**

**<https://hal.science/hal-03723671>**

Submitted on 15 Jul 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

## Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021)

Thierry Lucas et Jesús García Sánchez

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/baefe/6404>

DOI : 10.4000/baefe.6404

ISSN : 2732-687X

### Éditeur

ResEFE

Ce document vous est offert par Bibliothèque de l'École française d'Athènes



### Référence électronique

Thierry Lucas, Jesús García Sánchez, « Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021) » [notice archéologique], *Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger* [En ligne], Grèce, mis en ligne le 12 juillet 2022, consulté le 15 juillet 2022. URL : <http://journals.openedition.org/baefe/6404> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/baefe.6404>

---

Ce document a été généré automatiquement le 14 juillet 2022.



Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International  
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

---

# Opération LiDAR à Akraiphia et au Val des Muses, Béotie (2021)

Thierry Lucas et Jesús García Sánchez

---

## NOTE DE L'AUTEUR

**Date précise de l'opération :** 12 mai 2021

**Autorité nationale présente :** Alexandra Charami, Éphorie des antiquités de Thèbes

**Numéro de mission :** I48

**Organismes financeurs :** École française d'Athènes

**Établissements porteurs de l'opération :** École française d'Athènes

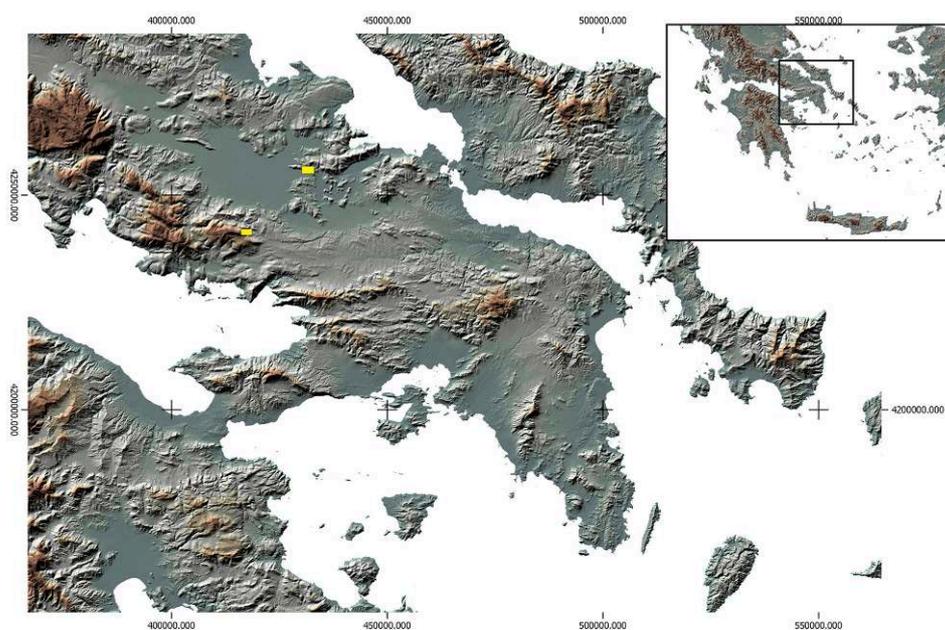
### **Remerciements :**

*Les auteurs tiennent à remercier l'éphorie des antiquités de Thèbes, et en particulier sa directrice Alexandra Charami, sans qui cette étude n'aurait pas été possible, ainsi que Périklis Boutzoukis, notre contact auprès de l'entreprise Aerophoto.*

## La mission de 2021 : enjeux et spécifications techniques

- 1 Pour faciliter l'étude des fortifications et du site de la ville antique d'Akraiphia, dans le cadre du projet d'EFA porté par Thierry Lucas, une campagne d'acquisition de données LiDAR par avion a été menée sur le site. À cette occasion, il a également été décidé de profiter de la mission pour inclure dans le plan de vol un autre site béotien où l'EFA mène actuellement des recherches, le sanctuaire du Val des Muses, en collaboration avec l'équipe française travaillant sur ce site (Yannis Kalliontzis, Guillaume Biard) et avec l'équipe du *Boeotia Project* (John Bintliff, qui a généreusement participé au financement de la mission) (**fig. 1**).

Fig. 1. Carte générale de la région.



En jaune, les deux zones couvertes par les données LiDAR.

EFA, DAO J. García Sánchez.

- 2 Dans le cas d'Akraiphia, l'enjeu était d'offrir une alternative à la prospection sur l'acropole, couverte par une végétation basse typiquement méditerranéenne (maquis de chênes verts) qui rend la circulation difficile et la visibilité au sol quasi-nulle. L'objectif principal était donc de repérer, si possible, des traces d'occupation sur le sommet de la colline de Skopia et sur ses flancs. L'objectif secondaire était d'aider à l'étude de la muraille, déjà documentée sur un plan levé en 1996 par le topographe Frank Perdrizet<sup>1</sup>.
- 3 Au Val des Muses, le contexte est différent, puisque la végétation présente sur le site du sanctuaire même est plus rase qu'à Akraiphia. La visibilité au sol étant généralement convenable, l'enjeu était plus modeste : retrouver la trace des tranchées de fouilles anciennes et des monuments décrits lors des fouilles du XIX<sup>e</sup> siècle, identifier si possible les limites de la zone occupée par le sanctuaire et, dans le meilleur des cas, les traces de vestiges non documentés.
- 4 Plus largement, cette mission présente un enjeu important pour explorer un outil technique et un type de données encore peu exploités à l'EFA. De ce point de vue, la couverture de deux sites au faciès différent permet de mettre en avant les qualités, mais aussi les limites des données LiDAR dans un contexte méditerranéen.
- 5 Le vol d'acquisition des données a été confié à la société Aerophoto Ltd, basée à Thessalonique. La mission, prévue pour 2020, a dû être repoussée en raison du contexte sanitaire, et le vol a finalement eu lieu le 13 mai 2021. Le capteur employé pour la captation était un RIEGL VQ1560II, couplé avec un appareil photo PhaseOne iXU-RS 1000, sur une monture stabilisée SOMAG GSM 4000. Les images captées en même temps que les données LiDAR ont permis en outre de calculer une orthophoto

(rés. 5,5 cm), d'une résolution bien meilleure que les images satellites librement accessibles.

- 6 Les données acquises sur les deux sites ont été livrées brutes (sans classification). Elles sont d'excellente qualité : 86 premiers retours par m<sup>2</sup> en moyenne pour Akraiphia<sup>2</sup>, 97 pour le Val des Muses, ce qui est, dans les deux cas, amplement suffisant pour un usage archéologique. Les données d'Akraiphia ont été traitées par Thierry Lucas tandis que celles du Val des Muses ont été confiées à Jesús García Sánchez, permettant en outre de comparer deux processus de traitement différents.

## Akraiphia (Thierry Lucas)

### Traitement des données

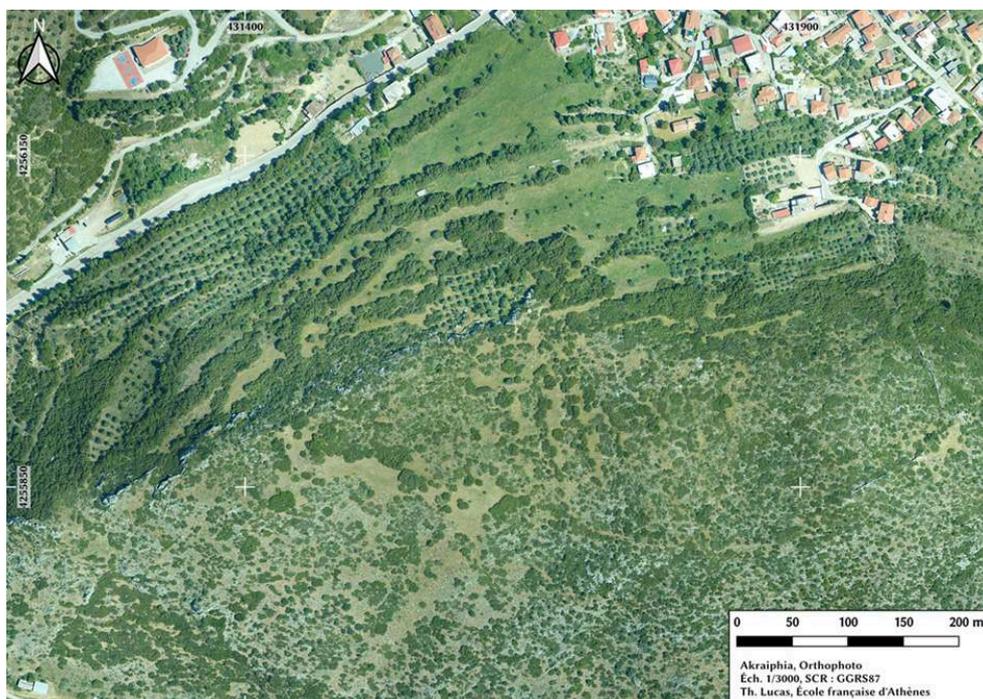
- 7 Les données d'Akraiphia ont été traitées par Thierry Lucas, qui s'est formé pour l'occasion, grâce notamment aux précieux conseils de J. García Sánchez ; l'enjeu était de mettre en place un protocole complet de traitement, de la donnée brute à la visualisation du modèle de terrain, si possible avec des logiciels libres et open-source accessibles gratuitement.
- 8 Après divers essais, un protocole de traitement a été mis en place en faisant appel principalement aux outils du programme Whitebox Tools<sup>3</sup>, disponible sous forme de plugin de QGIS. Un autre programme, Point Data Abstraction Library<sup>4</sup>, a également été utilisé de façon marginale, essentiellement pour filtrer le bruit et les aberrations du jeu de données initial, en faisant appel aux filtres *filters.outlier* et *filters.elm*.
- 9 Pour le filtrage des points de sol, un processus a été mis en place à partir de l'outil de Whitebox Tools LidarGroundPointsFilter, qui fait appel à l'algorithme SBF (Slope-Based Filter)<sup>5</sup> : le nuage de points préalablement nettoyé du bruit, des aberrations et des points correspondant aux bâtiments<sup>6</sup>, a été soumis à trois itérations successives de l'algorithme, en utilisant des paramètres décroissants pour les valeurs de rayon et d'angle<sup>7</sup> : une première passe avec un rayon de 2,5 m, un angle de 60° et une hauteur de 2 m, une deuxième passe avec un rayon de 1,5 m, un angle de 30° et une hauteur de 0,75 m, et enfin une troisième passe avec un rayon de 0,75 m, un angle de 15° et une hauteur de 0,25 m. Ce processus, plus complexe qu'une simple itération de l'algorithme, permet de filtrer efficacement la végétation basse tout en préservant précisément la morphologie du terrain. En regard, les essais avec une seule itération de l'algorithme, ou avec d'autres algorithmes<sup>8</sup>, se sont révélés moins efficaces, soit parce qu'ils laissaient subsister une partie de la végétation basse au point d'affecter la lisibilité du modèle (erreurs de type II), soit parce qu'ils lissaient les reliefs naturels de façon trop importante et effaçaient des vestiges archéologiques, notamment le relief correspondant au mur d'enceinte de la cité (erreur de type I). Enfin, les points correspondant aux bâtiments ont été réintégrés au résultat final<sup>9</sup>. Le fichier obtenu en sortie contient donc uniquement les points de sol et le bâti. La densité de points, une fois ces opérations de filtrage effectuées, est de 25 points par m<sup>2</sup> en moyenne. Au sommet de l'acropole, malgré la végétation basse, elle est relativement élevée (26 points par m<sup>2</sup>), en raison notamment du chevauchement des deux lignes de vol. Certaines zones sont cependant nettement moins bien loties, notamment les parties boisées du flanc nord de l'acropole.

- 10 À partir de ce nuage de points, deux Modèles Numériques de Terrain<sup>10</sup> ont été créés grâce à l'outil LidarIdwInterpolation, en utilisant les paramètres de pondération et de rayon suggérés par B. Štular, E. Lozić et St. Eichert<sup>11</sup> : un MNT d'une résolution de 0,5 m (4 pixels par m<sup>2</sup>) et un MNT d'une résolution de 0,2 m (25 pixels par m<sup>2</sup>). Les deux MNT ont été « nettoyés » des éventuelles irrégularités dues à la végétation persistante avec l'outil RemoveOffTerrainObjects (dimension=4, pente=20°). Pour un usage général, à l'échelle du site, le MNT le moins défini est préférable, car il fait mieux ressortir les structures significatives<sup>12</sup>. Le MNT à 25 pixels par m<sup>2</sup> sert uniquement pour des zooms sur les zones les mieux définies.
- 11 Enfin, à partir du nuage de points initial, nettoyé du bruit et des aberrations, un Modèle Numérique de Surface d'une résolution de 100 pixels par m<sup>2</sup> a été créé grâce à l'outil LidarIdwInterpolation<sup>13</sup>. Ce modèle a essentiellement été utilisé pour aider à la lecture de l'orthophotographie ; la haute résolution de ce modèle permet de distinguer des éléments de la taille d'un bloc.
- 12 Pour la visualisation des MNT, c'est le logiciel QGIS qui a été employé, couplé avec l'extension RVT<sup>14</sup> pour bénéficier de techniques avancées pour faire ressortir les micro-reliefs. D'autres techniques d'ombrage plus simples, en utilisant les fonctionnalités par défaut de QGIS et l'outil MultidirectionalHillshade de Whitebox, ont également été utilisées.

## Résultats préliminaires

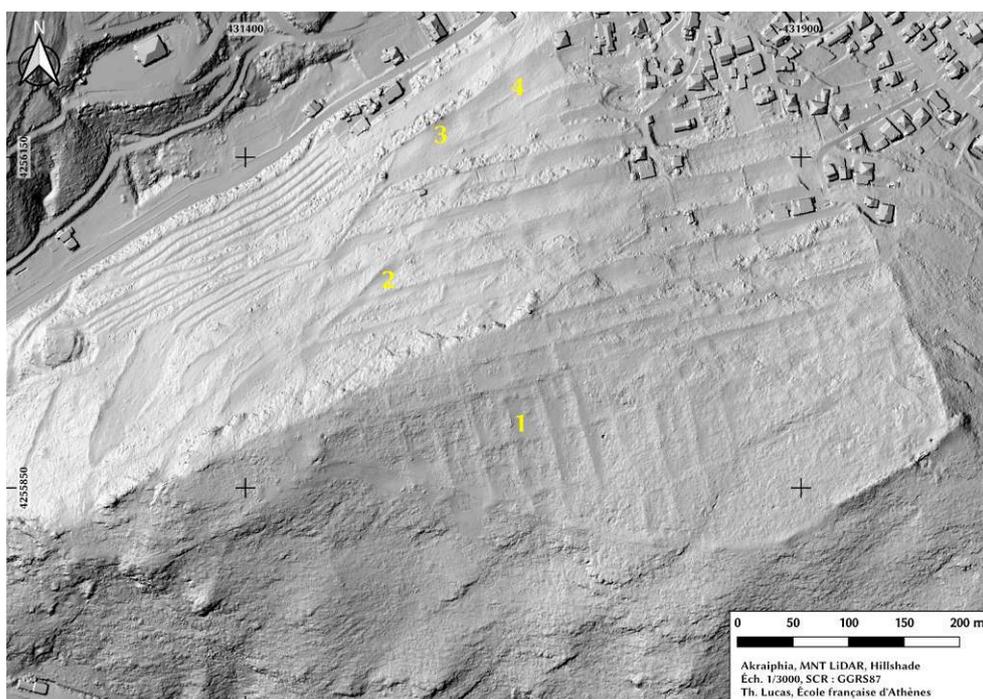
- 13 On pouvait déjà distinguer, sur l'imagerie aérienne, une alternance de zones couvertes par la végétation et de zones nues, aussi bien au sommet de l'acropole que sur le flanc nord de la colline de Skopia, où des vestiges de terrasses se laissent aisément distinguer. Sur le sommet de l'acropole, la végétation forme également par endroits des lignes plus ou moins parallèles, ce qui laissait penser que l'occupation antique avait durablement marqué le terrain (**fig. 2**). Le MNT issu des données LiDAR permet cependant d'aller beaucoup plus loin (**fig. 3**, **fig. 4**) : la trame urbaine est nettement visible sur le sommet de l'acropole, en particulier un ensemble d'îlots particulièrement bien lisible (**fig. 3**, n° 1), de dimensions homogènes, formant des modules assez nets de 32 mètres sur 49 environ (soit 100 pieds sur 150). Ces îlots sont étagés en terrasses pour pallier la déclivité du terrain. Dans la partie orientale de l'acropole, de même que le long de la crête qui borde l'acropole au nord, un module différent, plus petit, se laisse cependant deviner. Il est impossible de dire si cette trame urbaine orthonormée était densément occupée dans son ensemble ; il existe bien des cas en Béotie, à Platées par exemple<sup>15</sup>, où l'on a pu mettre en évidence une trame urbaine orthonormée restée en grande partie inoccupée ; malgré tout, des vestiges de bâtiments sont nettement perceptibles dans l'ensemble d'îlots déjà mentionné (**fig. 3**, n° 1), dans un quartier qui devait pourtant être assez éloigné du cœur de la ville antique.

Fig. 2. Orthophoto de la zone de l'acropole d'Akraiphia, éch. 1 :3000.



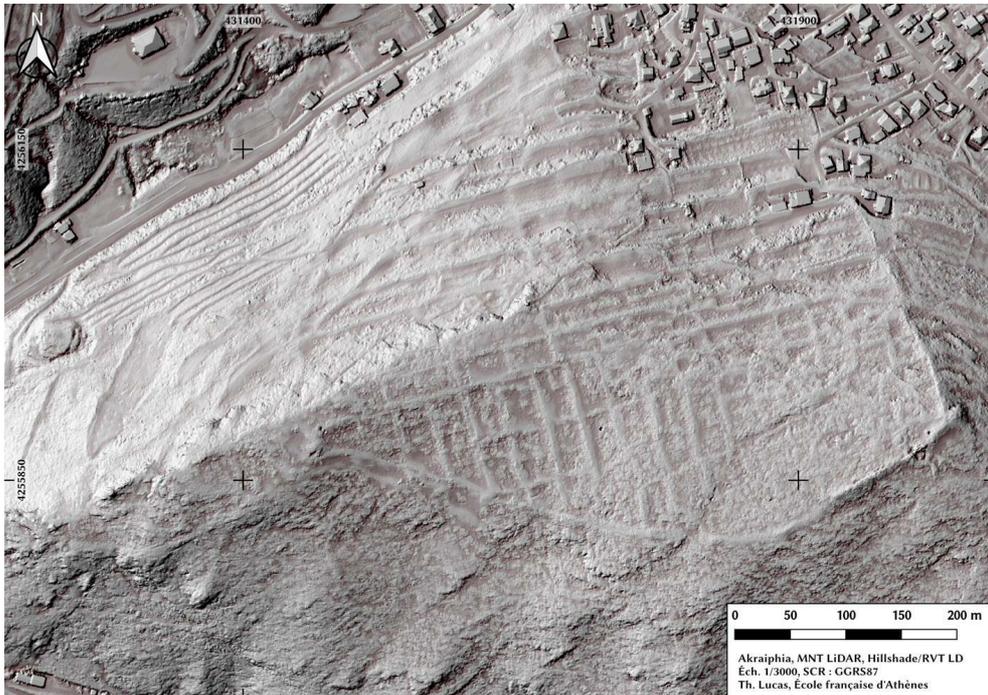
EFA, DAO Th. Lucas.

Fig. 3. Visualisation du MNT, rés. 0,5 m, Whitebox MultidirectionalHillshade. éch. 1 :3000.



EFA, traitement et DAO Th. Lucas.

Fig. 4. Visualisation du MNT, rés. 0,5 m, Whitebox MultidirectionalHillshade / RVT Local Dominance. éch. 1 :3000.



EFA, traitement et DAO Th. Lucas.

- 14 Le flanc nord de l'acropole, où le gros de la ville devait s'étager, n'offre pas de résultats aussi spectaculaires : les terrasses étaient pour l'essentiel déjà visibles, et les ruptures de pente, fortement couvertes par une végétation dense, n'ont pas livré de données supplémentaires. Quelques axes nord-sud sont cependant perceptibles, de même qu'au moins deux diagonales (l'une d'entre elles se détache nettement dans la fig. 3, n° 2), dont on ne peut dire avec certitude qu'elles doivent être rattachées à la trame urbaine antique. Sur la partie occidentale de ce versant, où le terrain a été lourdement remanié à des fins agricoles, il n'est pas possible de lire des traces qui pourraient être rattachées avec certitude à la ville antique.
- 15 Dans le bas de la pente, en revanche, une cavité semi-circulaire, de 30 m de diamètre environ, correspond sans aucun doute au théâtre antique (fig. 3, n° 3). L'édifice est en outre situé à l'extrémité ouest d'un espace de forme trapézoïdale qui se détache nettement du reste du plan (fig. 3, n° 4), où l'on distingue également plusieurs lignes qui correspondent soit à des terrasses, soit aux soubassements d'édifices importants. Cet espace occupe environ 1,4 ha, mais il a probablement été nettement rogné par les aménagements modernes. En toute probabilité, il s'agissait d'un espace public, peut-être l'agora antique, que M. Feyel et P. Guillon avait cherchée en vain un peu plus à l'est<sup>16</sup>.
- 16 Le tracé de l'enceinte, enfin, peut être suivi très nettement sur le MNT. Une étude approfondie est nécessaire, mais plusieurs tours pourront être localisées grâce aux reliefs qu'elles forment.
- 17 Dans l'ensemble, le bilan de l'opération à Akraiphia est extrêmement positif : les données LiDAR permettent de restituer les éléments importants de la ville antique avec précision. Il s'agit là d'un outil technique clairement adapté à ce type de contexte,

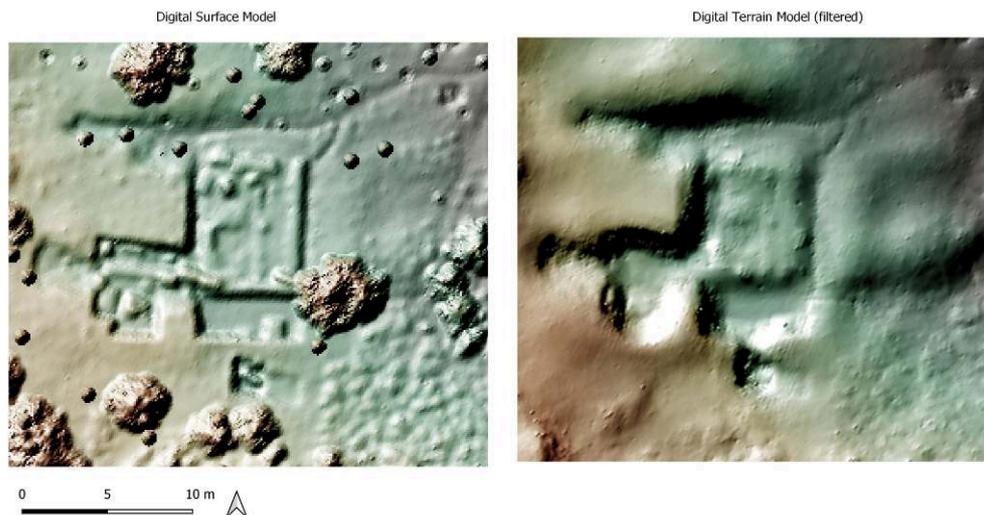
malgré la présence de végétation basse. Il reste cependant beaucoup à faire pour analyser ces données plus finement, aussi bien sur l'acropole que dans les abords immédiats de la ville antique.

## Val des Muses (Jesús García Sánchez)

### Méthodologie

- 18 Les données brutes du Val des Muses se présentent sous la forme d'un unique fichier LAS de 5,5 GB. Cette taille rend le processus de traitement extrêmement lent et difficile. Le fichier a donc été divisé en tuiles de 200 mètres de côté pour faciliter le traitement et la visualisation.
- 19 Le processus de classification des points de sol requis pour produire un Modèle Numérique d'Élévation (DEM) du sol nu a été mené avec les commandes basiques de Lastools, à savoir Lastile, Lasground et Las2Dem, en utilisant -extrafine et -archaeology comme paramètres pour la classification des points de sol. La boîte à outils Whitebox Tools a été utilisée en parallèle pour produire d'autres images, afin d'esquisser des comparaisons méthodologiques. Une première visualisation des données LiDAR brutes comme Modèle Numérique de Surface (avant filtrage) montre clairement le potentiel de ces données (fig. 5). L'autel des Muses apparaît très clairement, les murs sont nettement visibles, ainsi que les blocs épars autour du monument.

Fig. 5. Zone de l'autel avant traitement (g) et après traitement (d), visualisée dans planlauf/TERRAIN.



EFA, traitement et DAO J. García Sánchez.

- 20 La méthode d'interpolation du script utilisé ne permet que la création d'un DEM de 1 m de résolution. Cependant, la qualité des données est très bonne et permet aisément d'employer une meilleure résolution. Les tuiles de 200 m de côté contenant uniquement les points de sol ont été fusionnées en un seul fichier, et c'est donc l'outil Whitebox LidarIdwInterpolation qui a été utilisé pour interpoler à partir des points trois DEM d'une résolution de 10, 25 et 50 cm, qui permettent de représenter plus finement la

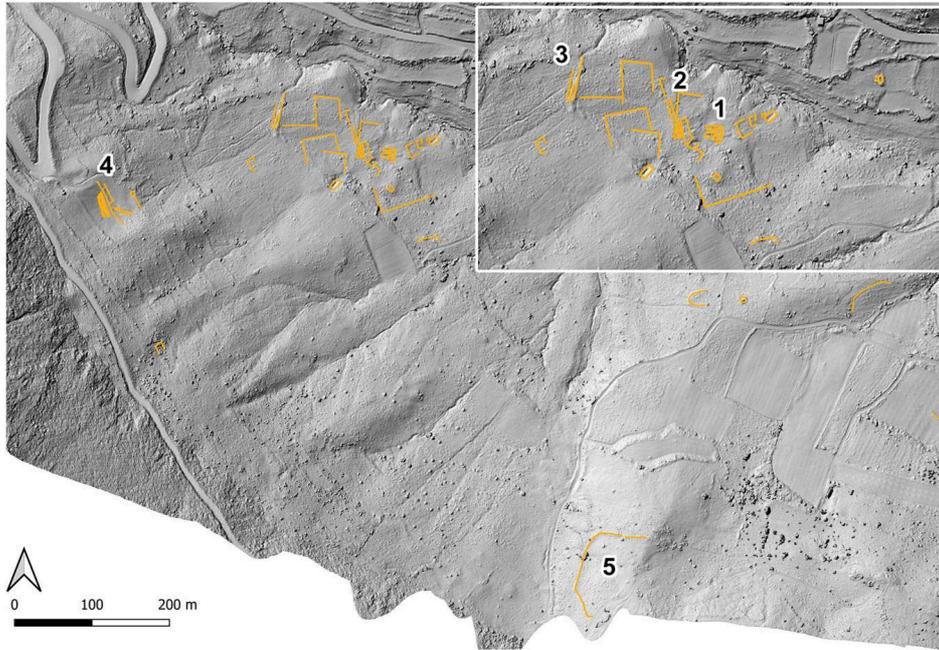
surface du sol nu. Cet outil permet à l'utilisateur de définir lui-même la résolution et le rayon de l'interpolation.

- 21 Pour la visualisation, le DEM a été traité avec l'outil Relief Visualization Toolbox pour QGIS, une méthode désormais couramment utilisée pour explorer les images en utilisant différentes techniques de visualisation<sup>17</sup>. Un traitement d'image complémentaire a été effectué grâce au logiciel SAGA, en utilisant la fonction « Gaussian filtering » pour débruiter le DEM et éviter les interférences de potentiels points subsistant au-dessus de la surface du sol.
- 22 Les données ont également été traitées et visualisées avec le logiciel planlauf/TERRAIN pour visualiser plus en détails certaines traces archéologiques, et notamment pour améliorer leur interprétation grâce à la visualisation en 3D. Par rapport à d'autres logiciels de visualisation, planlauf offre une implémentation intéressante du Local Relief Model, développée par R. Hesse<sup>18</sup>, pour faire nettement ressortir des variations infimes à petite échelle. Une autre méthode récente, SAILORE<sup>19</sup>, offre la possibilité d'explorer des DEM présentant des variations de hauteur importantes. L'orographie complexe du Val des Muses pourrait fournir un cas d'étude intéressant pour évaluer de nouvelles méthodes de visualisation de ce type.

## Résultats

- 23 La combinaison de plusieurs techniques de visualisation (principalement Hillshade, Local relief models, ainsi que l'orthophotographie) a livré de bons résultats. La **figure 6** présente une vue générale indiquant les structures identifiées. Les données présentées ici pourront servir à compléter l'étude ancienne de G. Roux<sup>20</sup>, mais pourront aussi servir de base pour les projets en cours dans la région<sup>21</sup>, notamment pour effectuer des vérifications sur le terrain.
- 24 La figure 6 montre une concentration importante de structures archéologiques sur les pentes, au sud du cours d'eau, le Permessos. Cette zone inclut notamment les vestiges de l'autel récemment réexaminé (1), déjà montrés dans notre figure 5. Les vestiges de l'autel sont clairement visibles malgré le filtrage. Pour être en mesure de repérer d'autres vestiges archéologiques, un compromis a dû être fait entre le filtrage de la végétation et la préservation des traces archéologiques les plus légères.

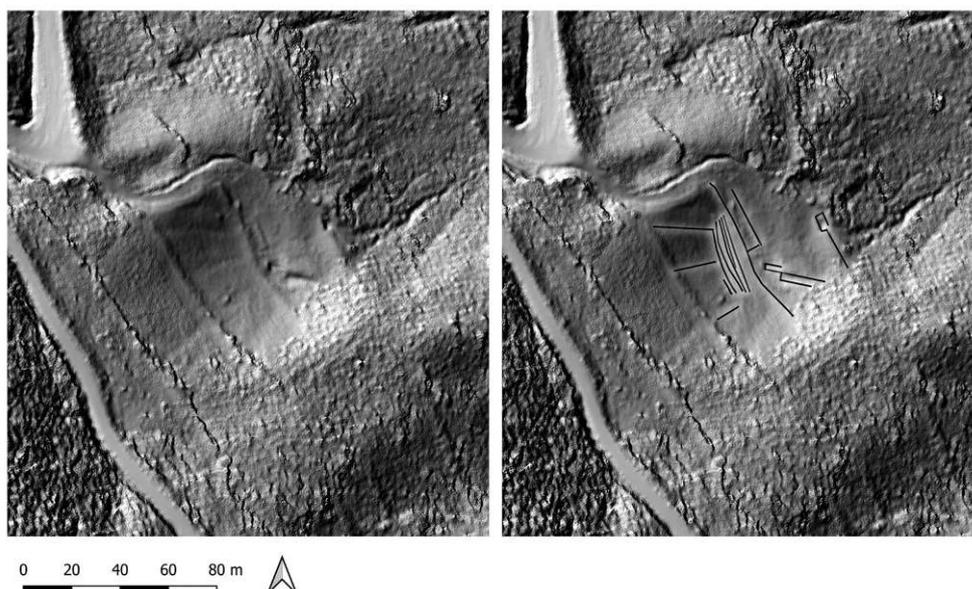
Fig. 6. Vue générale du DEM et zoom sur la zone de l'autel, avec interprétation des structures identifiées.



EFA, traitement et DAO J. García Sánchez.

- 25 Un autre élément important est le portique ionique (2), facilement identifiable grâce aux blocs affleurant à la surface. Ce portique a été étudié par G. Roux, d'après les travaux de P. Jamot et les relevés de P. Bonnard. Le bâtiment peut être suivi sur 64 m environ et semble recouper d'autres structures qui pourraient avoir appartenu au sanctuaire (potentiellement un mur de péribole).
- 26 Pour le reste, les abords de l'autel et du portique sont indéniablement la partie la plus riche en éléments de la zone couverte, et les structures linéaires identifiables en plusieurs endroits pourraient être les vestiges de terrassements ou des éléments de clôture liés au sanctuaire. En revanche, la présence de végétation basse empêche de repérer de façon assurée des blocs qui pourraient être liés à d'autres bâtiments appartenant au sanctuaire.
- 27 Outre le secteur du sanctuaire à proprement parler, d'autres éléments peuvent être détectés, notamment le théâtre situé au pied de l'Hélicon (**fig. 7**). Sur l'orthophotographie, des blocs dispersés et des structures partiellement visibles correspondent au bâtiment de scène du théâtre. Les données LiDAR illustrent nettement les éléments marquants du paysage qui correspondent à la structure attendue d'un théâtre, avec notamment des divisions de bas en haut. D'autres marques pourraient être interprétées comme les vestiges de gradins ; il pourrait également s'agir de traces liées à d'anciens labours dans la zone, mais dans ce cas les traces devraient être trop fines pour être visibles au LiDAR.

Fig. 7. Vue détaillée du théâtre, avec et sans interprétation.



EFA, traitement et DAO J. García Sánchez.

- 28 Plus loin au sud, la structure 5 peut être interprétée comme un mur d'enclos abandonné, de date et de fonction indéterminées. Il pourrait être lié à des pratiques d'élevage dans la région. D'autres structures de ce type sont visibles dans la partie la plus à l'est de la couverture LiDAR, le long du Permessos, dont la chronologie et la fonction sont là encore incertaines.
- 29 Au Val des Muses la résolution des données LiDAR après classification est de 70 points par m<sup>2</sup> environ, ce qui permet d'atteindre pour le raster une résolution de 0,1 m. Les données sont donc excellentes pour un usage archéologique. Cependant, il faut les utiliser avec précaution. Comme le montre l'orthophotographie, le Val des Muses est couvert d'une végétation rase qui peut créer des artefacts, aussi bien lors de la classification que lors de la visualisation. Les structures décrites ici devront donc être vérifiées sur le terrain, comme c'est généralement le cas. Une partie d'entre elles, dans la zone explorée du sanctuaire, sont faciles à repérer et à identifier ; d'autres, en revanche, sont plus difficiles à visualiser et à interpréter. Cette étude n'est pas terminée, et la visualisation et l'interprétation de ces données LiDAR peut encore être améliorée, mais dans leur état actuel elles offrent en tout cas un outil idéal pour revisiter la zone.

## Conclusion et perspectives

- 30 En Grèce, l'absence de couverture nationale LiDAR librement accessible, comme on en trouve dans d'autres pays européens<sup>22</sup>, est clairement un frein au développement de recherches archéologiques non-invasives dans le pays. Dans le cas présent, l'acquisition de données pour appuyer la recherche sur deux sites différents a permis de mieux documenter et de mieux comprendre les sites archéologiques en question, mais aussi les paysages qui les entourent. Ces données, à Akraiphia comme au Val des Muses, sont d'une grande valeur, notamment dans les zones où la végétation basse est épaisse, au point d'empêcher parfois l'observation et même l'accès. Les données LiDAR sont

clairement adaptées pour faciliter l'étude de tels sites, vastes et couverts de végétation. Il s'agit donc d'une approche extrêmement prometteuse pour l'avenir.

---

## BIBLIOGRAPHIE

CERRILLO CUENCA, LÓPEZ LÓPEZ 2020 = Enrique Cerrillo Cuenca, Adara López López, « Evaluación y perspectivas del uso del LiDAR en la arqueología española », *Boletín del Museo Arqueológico Nacional* 39, 2020, p. 219-236.

FEYEL 1955 = Michel Feyel, « Inscriptions inédites d'Akraiphia », *BCH* 79, 1955, p. 419-423.

GARCÍA SÁNCHEZ 2018 = Jesús García Sánchez, « Archaeological LiDAR in Italy: Enhancing Research with Publicly Accessible Data », *Antiquity* 92, 2018, <https://doi.org/10.15184/aqy.2018.147>.

HESSE 2012 = Ralf Hesse, « Using lidar-derived Local Relief Models (lrm) as a new tool for archaeological prospection », in Sjoerd J. Kluiving, Erika B. Guttman-Bond (éd.), *Landscape Archaeology between Art and Science. From a Multi- to an Interdisciplinary Approach*, 2012, p. 369-378.

KOKALJ, HESSE 2017 = Žiga Kokalj, Ralf Hesse, *Airborne laser scanning raster data visualization. A Guide to Good Practice*, Ljubljana, Založba ZRC, 2017.

KONECNY, ARAVANTINOS, MARCHESE 2013 = Andreas Konecny, Vassilis Aravantinos, Ron Marchese, *Plataiai. Archäologie und Geschichte einer boiotischen Polis*, Vienne, Österreichisches Archäologisches Institut, 2013.

MÜLLER 1996 = Christel Müller, « Le Ptoion et Akraiphia (Béotie) », *BCH* 120, 1996, p. 853-864.

ŠTULAR, LOZIĆ, EICHERT 2021a = Benjamin Štular, Edisa Lozić, Stefan Eichert, « Airborne LiDAR-Derived Digital Elevation Model for Archaeology », *Remote Sensing* 13 (2021), 1855.

ŠTULAR, LOZIĆ, EICHERT 2021b = Benjamin Štular, Edisa Lozić, Stefan Eichert, « Interpolation of Airborne LiDAR Data for Archaeology », 2021, pre-print hal-03196185.

ROUX 1954 = Georges Roux, « Le Val des Muses, et les Muses chez les auteurs anciens », *BCH* 78, 1954, p. 22-48.

TOUMAZET, SIMON, MAYORAL 2021 = Jean-Pierre Toumazet, François-Xavier Simon, Alfredo Mayoral, « Self-Adaptive Local Relief Enhancer (SAILORE): A New Filter to Improve Local Relief Model Performances according to Local Topography », *Geomatics* 1, 2021, p. 450-463. <https://doi.org/10.3390/geomatics1040026>.

ZAKSEK, OŠTIR, KOKALJ 2011 = Klemen Zaksek, Krištof Oštir, Žiga Kokalj, « Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique », *Remote Sensing* 3, 2011, p. 398-415. <https://doi.org/10.3390/rs3020398>.

## NOTES

1. Voir MÜLLER 1996, p. 858.

2. En raison du chevauchement des lignes de vol, la densité de premiers retours sur l'acropole est nettement supérieure à 100 points par m<sup>2</sup>.

3. <https://github.com/jblindsay/whitebox-tools> ; <https://www.whiteboxgeo.com/>.

4. <https://github.com/PDAL/PDAL> ; <https://pdal.io/>.

5. Cet algorithme compare chaque point avec ses voisins, dans un rayon défini par l'utilisateur ; si un point est séparé des points du voisinage par un angle supérieur au seuil défini par l'utilisateur, il est écarté ; sinon, il est retenu comme point de sol. Plus le rayon est grand et plus l'angle est faible, plus l'algorithme sera à même de traiter les objets, et notamment la végétation, et de les éliminer, mais cela se fait au détriment des reliefs abrupts (crêtes, ruptures de pente fortes). Le processus en trois itérations décrit ici permet dans une certaine mesure de remédier à ces défauts.

6. Ceux-ci ont été déterminés à partir de l'outil `ClassifyBuildingsInLidar`, puis extraits avec l'outil `FilterLidarClasses`. La technique d'identification des bâtiments de Whitebox Tools présente l'avantage de reposer sur une couche de polygones correspondant à l'emprise des bâtiments. Pour un usage archéologique, il est donc possible de créer des polygones correspondant aux structures en élévation (murs, etc.) déjà connues ou repérées sur l'orthophotographie, afin qu'elles ne soient pas écartées lors du filtrage des points de sol.

7. Pour les autres paramètres, la case « perform initial ground slope normalization » a été laissée cochée pour les trois passes, et la case « classify points » a été décochée afin de créer en sortie un nouveau nuage de points contenant uniquement les points filtrés. Le seuil de hauteur a été fixé, comme les autres paramètres, de manière décroissante (2 m, 0,75 m, 0,25 m). Le paramètre « *minimum number of neighbours* » ne semble pas affecter le résultat de manière significative.

8. Les algorithmes suivants ont été testés : PTIN (algorithme propriétaire utilisé par la suite Lastools (<http://lastools.org/>), testé directement *via* Lasground et *via* la boîte à outils Open LiDAR Toolbox (<https://github.com/stefaneichert/OpenLidarToolbox>) ; MCC et PMF (algorithmes libres testés *via* lidR (<https://github.com/r-lidar/lidR>, <https://github.com/Jean-Romain/lidRplugins>) ; WLF (algorithme libre utilisé par la suite Fusion ([http://forsys.cfr.washington.edu/FUSION/fusion\\_overview.html](http://forsys.cfr.washington.edu/FUSION/fusion_overview.html)). Seul l'algorithme PMF s'est avéré aussi efficace que le processus proposé ici pour filtrer la végétation basse, mais au détriment des reliefs.

9. Cette étape est faite avec l'outil de Whitebox Tools `LidarJoin`.

10. Pour ce type de produit mixte, incluant le sol et le bâti, B. Štular, E. Lozić et St. Eichert proposent le terme de Digital Feature Model (DFM) (ŠTULAR, LOŽIĆ, EICHERT 2021a). On parlera ici néanmoins de Modèle Numérique de Terrain, faute d'un équivalent en français.

11. ŠTULAR, LOŽIĆ, EICHERT 2021b, p. 16 : `weight=3, radius=5`.

12. Cf. ŠTULAR, LOŽIĆ, EICHERT 2021a, p. 12.

13. En raison de la grande densité de premiers retours, la valeur de la pondération a été doublée (`weight=6`) pour rendre la lisibilité du modèle optimale. Cet outil a été préféré à l'outil spécial `LidarDigitalSurfaceModel`, qui présentait le défaut d'excéder les capacités de calcul de l'ordinateur utilisé.

14. <https://github.com/EarthObservation/rvt-qgis> ; <https://rvt-py.readthedocs.io/en/latest/qgis.html>.

15. Voir notamment KONECNY, ARAVANTINOS, MARCHESE 2013, p. 38-39 ; 135-141 ; 187-189.
16. Voir notamment, pour les résultats de cette fouille, la notice quelque peu optimiste présentée dans la *Chronique des fouilles* du BCH 60 (1936), p. 461 ; et, pour une description plus nuancée, FEYEL 1955.
17. ZAKSEK, OŠTIR, KOKALJ 2011 ; KOKALJ, HESSE 2017.
18. HESSE 2012.
19. TOUMAZET, SIMON, MAYORAL 2021.
20. ROUX 1954.
21. Notamment la mission d'étude actuellement dirigée par Y. Kalliontzis et G. Biard, ainsi que l'étude en cours du *Boeotia Project* dirigé par J. Bintliff.
22. GARCÍA SÁNCHEZ 2018 ; CERRILLO CUENCA, LÓPEZ LÓPEZ 2020.
- 

## INDEX

**Thèmes :** EFA

**lieux** <https://ark.frantiq.fr/ark:/26678/crt15LsU8v1Kl>, Val des Muses

**sujets** <https://ark.frantiq.fr/ark:/26678/pcrtWlj2RNum>, <https://ark.frantiq.fr/ark:/26678/pcrthT7f96LxBR>, <https://ark.frantiq.fr/ark:/26678/pcrtaGFcSzXQ5x>, <https://ark.frantiq.fr/ark:/26678/pcrtF9P4mbuyGk>

**Année de l'opération :** 2021

## AUTEURS

**THIERRY LUCAS**

École française d'Athènes

**JESÚS GARCÍA SÁNCHEZ**

Instituto de Arqueología, Mérida (IAM), CSIC-Junta de Extremadura

## DIRECTEURFOUILLES\_DESCRIPTION

**THIERRY LUCAS**

École française d'Athènes