

Modélisation d'un *oppidum* sous couvert végétal dense, en Eure-et-Loir, par un LiDAR aéroporté par drone

Isabelle HEITZ – Dominique JAGU

L'archéologie fait appel depuis longtemps aux disciplines géophysiques au sol, aux photos aériennes prises depuis un avion ou d'un ULM. Des observations aériennes permettent aussi bien un repérage des vestiges non visibles du sol, qu'une localisation de sondages de reconnaissance ou de fouilles, au plus juste sur un site repéré. Dans certains cas, les observations aériennes sont un moyen non destructif d'étudier un site dans son ensemble, que l'on n'a pas l'intention de fouiller, en tout cas dans un premier temps. C'est bien cette raison qui a amené le CAEL (Comité Archéologique d'Eure-et-Loir) à demander à la société AIRD'ECO-drone de prospecter le site dit "du Camp de César", sur la commune de Changé - Saint-Piat (28), à 2 km au sud de Maintenon.

MOTS-CLÉS

LiDAR, archéologie, nuage de points, MNT, modélisation 3D, microtopographie

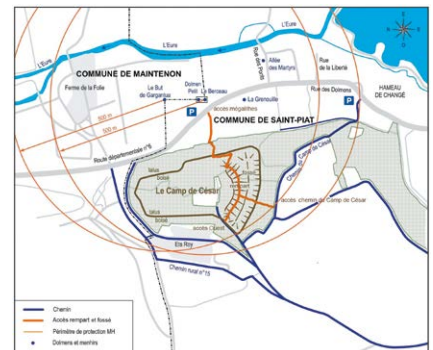


Figure 3. Situation du site et du musée

Comme ce site est couvert d'une épaisse végétation, de feuillus, taillis et buissons de buis, seule une observation aérienne par LiDAR était envisageable (figure 1). Le site dit du "Camp de César" est un *oppidum* d'une superficie de 5,5 ha, sur la rive gauche de l'Eure, surplombant une zone de sépultures néolithiques à mérovingiennes qui ont fait l'objet de recherches et de fouilles de 1924 à 1927 et de 1983 à 2000 (Jagu et al., 1998). Le musée des mégalithes de Changé, inauguré en 2015 (www.megalithesdechange.fr) expose les découvertes exceptionnelles effectuées, et en particulier ce que l'on nomme dorénavant, la biographie des mégalithes (figure 2).

La colline du Camp de César figurait en arrière-plan des fouilles des mégalithes (figure 3). Des relevés topographiques partiels et des observations avaient été réalisés par les équipes de fouilles en 1980. Puis le site avait été abandonné faute de moyens.

Mais c'est sans compter sur la passion et l'acharnement de quelques personnes, membres d'associations locales réunies (CEDSN, Comité d'Étude, de Documentation et de Sauvegarde de la Nature à Maintenon,

et l'Association pour la valorisation du patrimoine de Saint-Piat et Mévoisins) sous la bannière du CAEL ! Depuis les années 80, ces passionnés ont engagé des recherches bibliographiques, continué une démarche de maîtrise foncière du site et de communication en aménageant un sentier de visite à partir du musée, avec une devise : "faire connaître pour mieux protéger".



Figure 1. Vue aérienne et emprise de la prospection



Figure 2. Musée des mégalithes de Changé en contrebas du site

Un des enjeux est la datation de cet *oppidum* : si quelques objets de l'époque romaine ont été ramassés sur le sol, ce qui lui valut peut-être son nom de Camp de César, est-il possible que le lieu ait été utilisé auparavant, du temps des celtes, ou par les hommes ayant installé les lieux de sépultures néolithiques en contre-bas ? Vers quelle époque a été construit le rempart donnant à cet endroit une position stratégique ? Si classiquement les *oppida* sont considérés comme des habitats fortifiés de hauteur (ou de plaine) du 1^{er} siècle avant J.-C., celui de Changé ne répond pas forcément à cette datation (Leroi-Gourhan, 1988). Il est peut-être daté du Néolithique moyen jusqu'à la fin de l'Âge du Fer. Il faut bien retenir qu'il a peut-être été modifié au fil des siècles. César parle de *murus gallicus* dans la guerre des Gaules, qui sont

édifiés en terre, bois et pierres. C'est le modèle de rempart le plus fréquent en Europe vers 100 avant J.-C. Ce *murus gallicus* a pu être renforcé par un énorme rempart massif, précédé d'un fossé, comme à Châteaumeillant dans le Cher (Krausz, 2016).

Morphologie du Camp de César

Géographiquement, le site est un plateau en promontoire naturel de 5,5 hectares surplombant d'environ 40 mètres la vallée de l'Eure à l'est et une petite rivière maintenant asséchée à l'ouest et au nord. Les parois de ces deux pentes sont relativement abruptes. La position stratégiquement intéressante de ce plateau surélevé a été renforcée par la construction d'un rempart de 7 mètres au sud construit grâce aux matériaux creusés sur place, laissant un fossé profond de 6 m à l'extérieur du dispositif (Figure 4). Le rempart "ferme" le site sur une longueur de 250 mètres.

Initiation de l'étude

Un relevé topographique complet du site n'avait jamais été réalisé et n'était

pas envisageable compte tenu du coût rendu inabordable par sa surface et la végétation dense qui le recouvre. La dernière publication (De Castro et Jagu, 2014) avait préconisé l'emploi d'un LiDAR aéroporté.

Jusqu'à présent les LiDAR étaient aéroportés par avion ou hélicoptère. De telles prospections étaient donc très coûteuses et ne permettaient pas de garantir la précision recherchée.

Depuis peu, des LiDAR ont été adaptés et miniaturisés pour être "emportés" par des drones. Nous avons choisi le Mapper de marque YellowScan (YS), après étude de marché en décembre 2016. Ce capteur de 2 kg, émet des ondes laser de classe 1, d'une longueur d'onde de 905 nm, permet une prospection depuis une altitude maximale de 100 m, une précision de 4 cm, un angle de balayage du faisceau laser de 100°, 18 500 impulsions/seconde. Ce capteur fonctionne complètement indépendamment du drone. Il possède ses propres batteries, une centrale inertielle (Ellipse E de chez SBG systems couplé à une carte GPS AsterX-m de chez Septentrio), des capteurs GNSS (L1/L2 GPS, GLONASS, RTK-ready) et communique par radio avec une balise RTK au sol.

L'objectif de la mission était d'obtenir un plan topographique du site comme base de travail ultérieur en espérant que celui-ci fasse apparaître des éléments archéologiques identifiables.

Préparation de la mission

Le drone utilisé, le DPS4-Urban est un quadrimoteur "porteur" spécialement équipé pour accueillir le Mapper dont le poids de 2 kg est considéré comme "lourd" en matière de charge emportée par un multicopter professionnel. La charge totale du drone équipé est de 5,2 kg. Les batteries sont l'élément limitant du dispositif et un compromis fut recherché entre leur poids et leur puissance. Le choix que nous avons réalisé nous a permis de compter sur une autonomie de 15 minutes de vol – à moduler en fonction des conditions météorologiques (Figure 5).

Les ondes du LiDAR ne pénètrent pas la matière bien sûr, par conséquent, afin d'obtenir la plus grande pénétration des ondes du LiDAR à travers la végétation, nous avons attendu que les arbres de l'étage supérieur n'aient plus de feuilles, mettant à découvert l'étage végétal inférieur, buissons divers et buis à feuilles non caduques.

Les conditions météorologiques nous ont permis d'intervenir les 14 et 15 décembre 2016.

Réalisation de la mission

Nous avons réalisé 5 vols pour couvrir une surface de 10 ha en deux demi-journées, rendues nécessaires car les jours à cette saison sont très courts

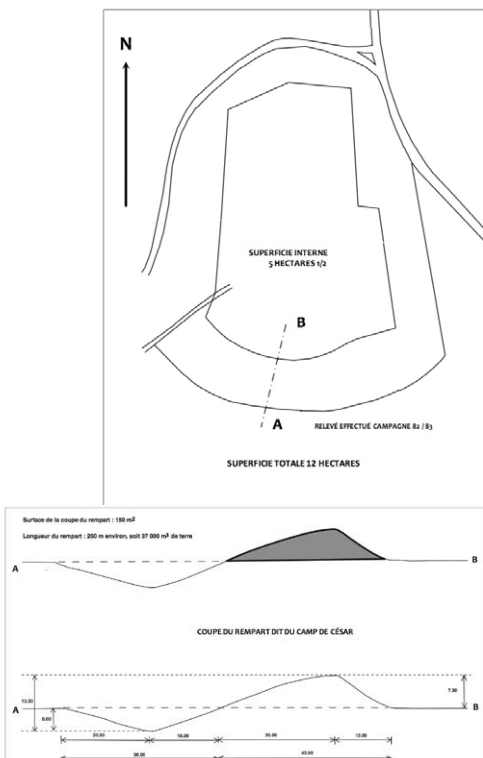


Figure 4. Coupe du rempart et du fossé



Figure 5. Drone DPS4-Urban équipé du capteur LiDAR MAPPER



Figure 6. Tracé des vols et installation de la balise RTK sol

et les températures trop basses pour voler en toute sécurité le matin. Les emplacements des points de décol-

lage ont été déterminés en fonction de l'accessibilité de la zone et de manière à avoir le drone en vue.

Les vols ont été réalisés à une altitude de 50 mètres, une vitesse de 4 m/s et un recouvrement des zones de vol de 50 % (Figure 6), correspondant à un écartement des bandes de vol de 50 mètres. La balise RTK sol (Figure 6) a été positionnée dans la clairière et

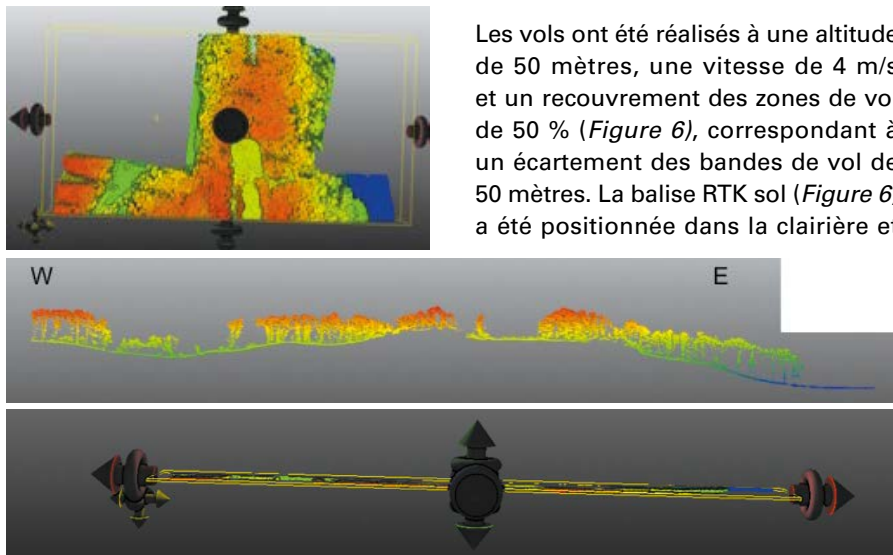
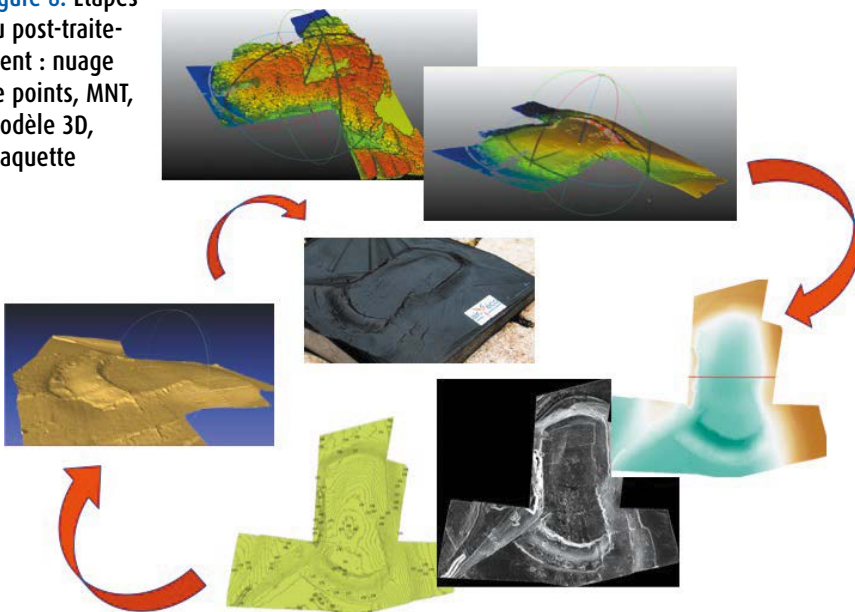


Figure 7. Coupe dans le nuage de points non classifié

Figure 8. Étapes du post-traitement : nuage de points, MNT, modèle 3D, maquette



sur le plateau pour une meilleure liaison avec le capteur aéroporté.

Dès l'atterrissage du drone, les données sont récupérées grâce à une clé USB et visualisées sur le terrain. Un plugin YS (Yellowscan) dans le logiciel Cloud Compare permet de calculer rapidement le tronçon de nuage de points. YS a techniquement amélioré la chaîne d'acquisition des données depuis (juin 2017), et, dorénavant, le nuage de points peut être vu instantanément sur un moniteur au sol, pendant que le drone vole et que le capteur enregistre (YS LiveStation). Cette visualisation permet de réajuster le cas échéant, le vol suivant.

Au-delà de la vérification, ceci est un puissant outil pédagogique à l'attention du client ou des chercheurs concernés, pour par exemple, bien comprendre à quoi correspond le nuage de points (Figure 7) et comment s'obtient le Modèle Numérique de Terrain (MNT).

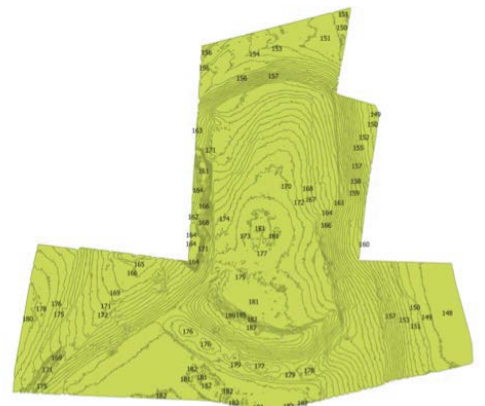


Figure 9. Courbes de niveau issues du MNT

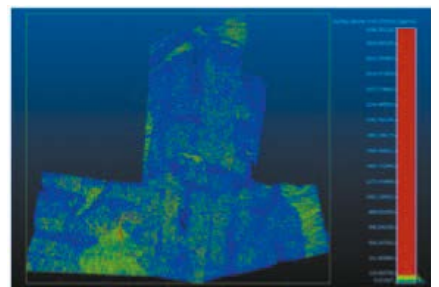


Figure 10. Carte de la densité de points enregistrés avant classification

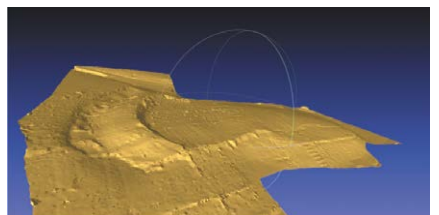


Figure 11. Modèle 3D

► Au final, nous avons enregistré une densité moyenne de 140 points/m², répartis selon la densité de la végétation (Figure 10).

Post-traitement

Après ajustement de niveaux de vol entre eux (via l'outil TerraScan), la chaîne du post-traitement est "classique" (Figure 8) : classification du nuage de points, traitement du MNT (QGIS) et sa vectorisation pour obtenir les courbes de niveau (Figure 9), modélisation (Figure 11) et orthophoto (3D Reshaper) (Figure 12). La dernière étape a consisté en l'impression 3D du modèle en résine.

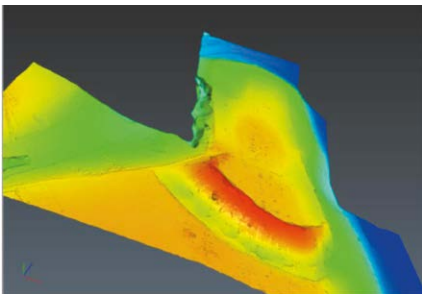


Figure 12. Orthophoto colorisée selon l'altitude visualisée en format PDF 3D

Résultats

La densité moyenne de points retenus après classification a été de 25 points/m². On peut considérer une précision de 5 à 15 cm sur la mesure en elle-même et compte tenu de la densité de points moyenne, nous avons choisi de calculer un MNT avec une précision de 20 cm. (1/ racine carrée de la densité de points)

■ Résultats issus du traitement du MNT :

Le logiciel QGIS, parmi d'autres SIG, permet de traiter le MNT obtenu (Figure 13) en créant des "ombrages" selon la topographie, la pente, etc. (Figure 14). Le traitement qui a fait apparaître le plus d'artéfacts dans notre cas, a été incrusté dans Google Earth pour une meilleure compréhension et localisation des éléments (Figure 15). Les archéologues à qui nous avons présenté ce document, ont été très intéressés par les éléments suivants :

- La courbure du rempart, et donc celle du fossé qui le borde, alors que l'on pensait que le rempart était plus rectiligne. Il apparaît surtout un "bourrelet rentrant" à l'extrémité ouest de

celui-ci. Ce relief positif vers l'intérieur évoque l'emplacement de l'entrée de l'*oppidum*. Cette entrée devait être encadrée par deux bourrelets rentrants, mais celui du côté ouest est détruit par l'ancienne carrière de calcaire et une excavation à bords nets, orientée selon une petite vallée asséchée NE-SO qui date certainement de l'époque de la construction de l'aqueduc de Maintenon (17^e s.). Nous avons retrouvé un vestige de ce 2^e bourrelet rentrant du côté ouest du chemin d'accès actuel. Deux bourrelets symétriques sont aussi visibles sur le bord NO du site faisant penser à une seconde entrée.

- La géométrie du fossé est un élément de datation (fond en "V" ou en "U"). Le MNT nous a permis d'effectuer des coupes sérieées sur toute la longueur du rempart. Nous avons pu vérifier la précision de notre modèle en effectuant une coupe à l'endroit précis d'un relevé topographique de terrain réalisé en 1980. Celui-ci coïncide de façon tout à fait satisfaisante. Les coupes sont en cours d'analyse à ce jour (Figure 16).
- A la périphérie du plateau, apparaissent des reliefs, en particulier sur

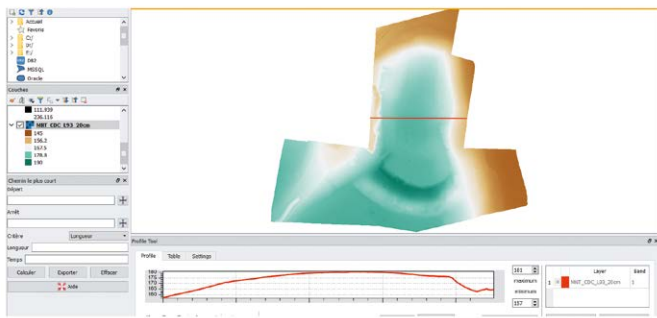


Figure 13. MNT et coupe ouest-est du MNT dans QGIS

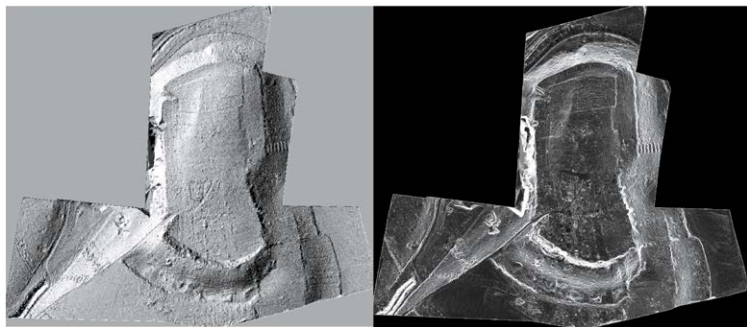


Figure 14. Traitement du MNT : ombrage et pente

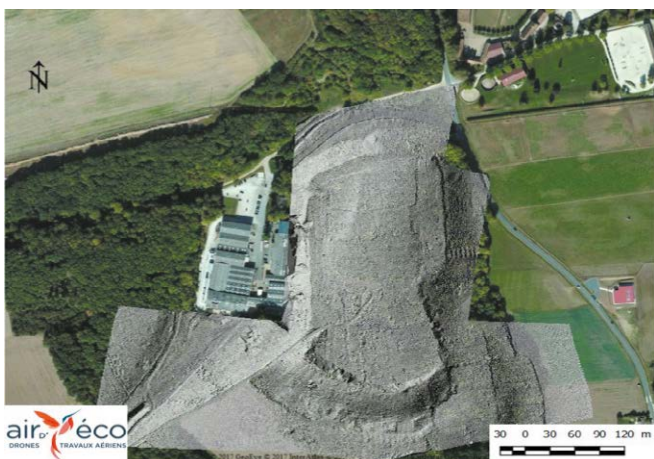


Figure 15. MNT "ombré" sur fond Google Earth

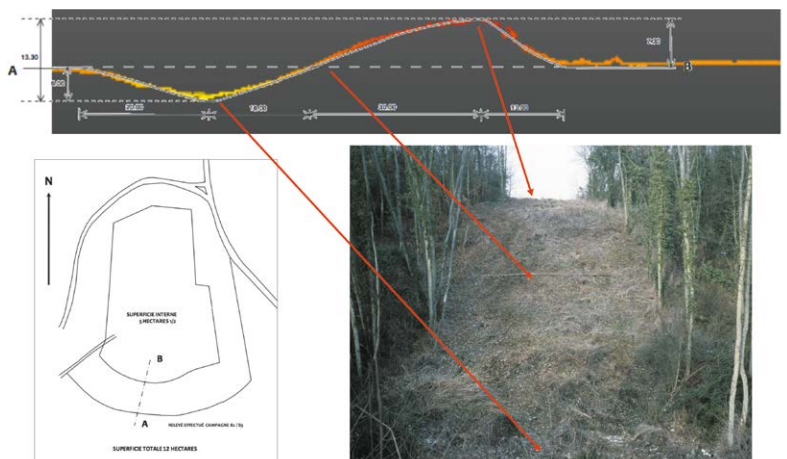


Figure 16. Corrélation relevé topographique de 1980 et MNT



Figure 17. Découverte du tracé d'un bâti, corrélé avec une parcelle sur document ancien, Manuscrit de Fréville 1859

le versant est, avec un décrochement au milieu. Sur ce versant, dans sa partie sud, une trace de muret descend perpendiculairement à la pente en direction de la vallée de l'Eure.

- Sur la partie nord du plateau, un rectangle en légère surélévation apparaît (Figure 18, image du haut) ; après recherche, cet élément se retrouve sur un plan (Manuscrit de

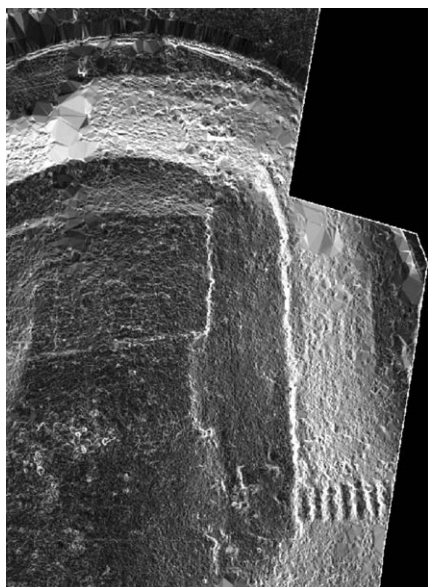


Figure 18. Découverte de terrasses sur le MNT, visibles sur une carte postale ancienne



Figure 19. Muret au sommet du rempart, prospection LiDAR portable sol envisagé

Fréville, 1859) (Figure 17) ; les archéologues émettent l'hypothèse d'une motte féodale, que seules des fouilles pourraient confirmer et dater.

- Au centre du plateau, d'autres "lignes", presque perpendiculaires apparaissent, que l'on a réussi à superposer précisément avec le plan parcellaire actuel. Elles pourraient correspondre à des légers fossés séparatifs de parcelles.
- Au centre, dans le versant est, le MNT fait apparaître clairement des "escaliers". Ce sont des terrasses d'une quinzaine de mètres de long, dont la régularité est invisible sur le terrain. Ces terrasses se devinent un peu plus au nord dans la pente. Nous en avons retrouvé trace sur une carte postale ancienne (Figure 18). Il est supposé que ces terrasses sont liées à la culture de vignes dont il est fait mention dans la bibliographie.

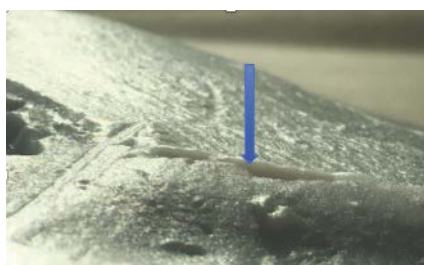


Figure 20. Muret visible sur la maquette 3D imprimée

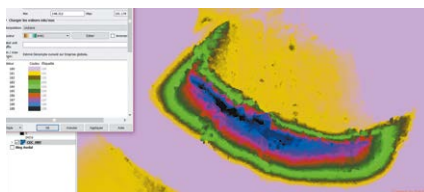


Figure 21. Altimétrie du sommet du muret et du rempart

■ Résultats issus de l'observation de la 3D :

L'une des requêtes des archéologues était d'obtenir autant que faire se peut, la microtopographie d'un petit muret construit (Figure 19) et semble-t-il inachevé sur la partie ouest et est du rempart, là où celui-ci est plus bas que sur sa partie centrale. Connaître précisément sa morphologie aurait peut-être permis de comprendre sa présence. Nous n'étions pas sûrs que les ondes du LiDAR atteignent le sol à cet endroit car cette zone est envahie par des buissons de buis très épais, ne laissant peu ou pas passer la lumière du jour. Nous avons anticipé en prévoyant une prospection LiDAR au sol à l'aide du Geoslam Revo (Figure 19, photo en bas à droite).

C'est l'observation de la maquette 3D qui nous a confirmé que le Mapper avait été suffisamment puissant pour enregistrer assez de points au sol permettant de restituer ce petit muret (Figure 20). Nous avons d'ailleurs pu démontrer que l'altitude du sommet de ce petit muret était la même que celle du sommet du rempart dans son milieu (Figure 21). L'hypothèse actuelle est que le muret aurait pu servir de guide de construction pour le rempart.

Conclusion

L'efficacité du LiDAR pour une application en cartographie et en archéologie a été "démontrée" !

Les avantages du LiDAR aéroporté sous drone présente les avantages suivants :

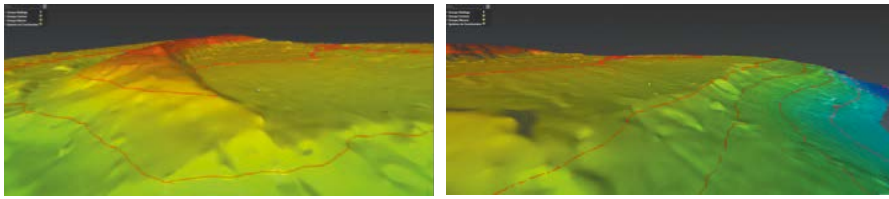


Figure 21. "Chemin de caméra" dans le modèle 3D



- C'est une technique non destructive d'investigation archéologique, par le biais de la mesure topographique.
- Rapide : un jour de mesure et une visualisation instantanée sur le terrain ; quelques jours de post-traitement. A savoir que cette technique nous permet de prospecter plusieurs dizaines d'hectares par jour en fonction des conditions d'accès et météorologiques.
- Cette technique permet de couvrir de grandes superficies : nous avons doublé la surface de l'*oppidum* afin d'obtenir des éléments du contexte.
- C'est une alternative au levé topographique classique, qui dans ce cas, n'aurait jamais été réalisé, compte tenu de son coût.
- Justement, le coût de cette prospection requérant une courte durée de mesure reste abordable (entre 4 et 10 K€ en fonction de la complexité de vol).

Au-delà de la carte topographique obtenue, qui était l'objet premier de la prospection, nous avons eu des résultats de deux ordres :

- Des précisions sur des éléments morphologiques pressentis (rempart, fossé, enceinte du camp fortifié, vallées adjacentes...)
- La découverte d'éléments morphologiques quasiment invisibles sur le terrain (bases fortifications, terrasses, bâti...)

Ces éléments sont apparus à différents stades du post-traitement : à l'étude du MNT, du modèle 3D et même à l'observation de la maquette, pour ce qui est de la microtopographie du muret sur le sommet du rempart.

Toutes ces visualisations permettent d'intégrer l'équipe des archéologues à toutes les étapes du post-traitement. Elles permettent aussi, dans un deuxième temps, d'engager une démarche de communication auprès du public : actuellement, une vidéo est

en cours de finalisation, intégrant des photos prises du sol et par drone, des interviews des différents spécialistes sollicités dans cette étude et enfin un visuel digne des meilleurs films d'anticipation : un chemin de caméra dans le modèle 3D (Figure 22), permettant au spectateur de découvrir l'*oppidum*, sans sa végétation, comme s'il volait à bord du drone !

Perspectives

D'autres prospections LiDAR de sites archéologiques tout ou partiellement recouverts de végétation sont programmées cet automne et hiver. La période la plus propice, en fonction de la végétation est de décembre à avril. Il est à noter que les capteurs que AIRD'ECO-drone utilise sont de plus en plus performants (Surveyor de YS par exemple) et permettent, au cas par cas, de travailler toute l'année, même lorsque les arbres sont feuillés. Nous avons également fait évoluer la technologie de notre drone "porteur" : devenu hexacoptère plus puissant (DPS6-big lift), il est équipé d'un parachute et de tous les équipements de sécurité permettant de voler en scénario "S3", c'est-à-dire en "zone peuplée". Ce drone élargit notre domaine d'intervention et répond à des demandes très variées en matière de topographie. ●

Remerciements

- CAEL, Comité Archéologique d'Eure & Loir,
- CEDSN, Comité d'Étude de Documentation et de Sauvegarde de la Nature à Maintenon,
- Association pour la valorisation du patrimoine de Saint-Piat et Mévoisins,
- ARCHEA, Association en Région Centre pour l'Histoire et l'Archéologie,
- Conseil Départemental d'Eure & Loir.

Contacts

Isabelle HEITZ, géophysicienne, fondatrice de la société AIRD'ECO-drone, contact@airdeco-drone.com

Dominique JAGU, archéologue, Comité Archéologique d'Eure-et-Loir, dominique.jagu@orange.fr

Hervé GALEPY, chargé de la valorisation audiovisuelle du site, h.galley@arceo.com

Laurent BOCHOT, constructeur de drones, dronesprovenceservices@gmail.com

Bibliographie

DE CASTRO Fatima et JAGU Dominique – 2014 : *Le Camp de César de Changé, commune de Saint-Piat. 1989-2014, 25 ans d'activités*. CAEL.

JAGU Dominique, BLUM Bernard, MOURAIN Jean-Marc – 1998 : *Dolmens et menhirs de Changé à Saint-Piat (Eure-et-Loir), témoins archéologiques des rites et pratiques funéraires des premiers agriculteurs beaucerons*. ARCHEA.

K. BAKUŁA, W. OSTROWSKI, M. SZENDER, W. PLUTECKI, A. SALACH, K. GÓRSKI – 2016 : *Possibilities for using LIDAR and photogrammetric data obtained with an unmanned aerial vehicle for levee monitoring*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1.

KRAUSZ Sophie – 2016 : *Le trésor de Châteaumeillant (Cher)*. ARCHEA.

Leroi-Gourhan André – 1988 : *Dictionnaire de la Préhistoire*. PUF.

ABSTRACT

The micro topography of an archeological hill fort of 5,5 ha, known since the 19th century but never explored because of its thick vegetation cover, has just been obtained thanks to a LiDAR Yellowscan airborne UAV survey. The results, finalized by a 3D printed model of the site, proved to be a wealth of information for archeologists (location of the entrance to the camp, fine geometry of the rampart, shape of the ditch, building site, discovery of terraces...) This work is the result of a multi-skill teamwork, around the prospecting company AIRD'ECO-drone: archeologists, funders, UAVs builder, Yellowscan, geomaticians.