

# LiDAR aéroporté par drone : pour un focus micro-topographique à l'échelle d'un site archéologique boisé. Méthodologie et retour d'expérience.

Airborne LiDAR by UAV: for a micro-topographic focus on the scale of a wooded archaeological site. Methodology and feedback.

Isabelle Le Tellier-Heitz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Géophysicienne et télépilote, fondatrice AIRD'ECO-Drone, contact@airdeco-drone.com

**RÉSUMÉ.** Dans le panel des techniques non invasives, les LiDAR aéroportés par avions, hélicoptères voire satellites ont, depuis plusieurs décennies, prouvé leur utilité dans l'exploration de grands secteurs boisés, forestiers ou inaccessibles. La miniaturisation des capteurs a permis d'emporter des capteurs LiDAR performants sous des drones civils légers, multirotors ou à voilure fixe. Ces microdrones permettent de dépasser les limites et inconvénients propres à l'aviation traditionnelle.

L'archéologie a bien sûr bénéficié de cette technologie qui s'avère complémentaire du relevé LiDAR par avion, de la photogrammétrie et du relevé par scanner terrestres...

Les nuages de points, MNT ombrés et modèle 3D font apparaître des artéfacts microtopographiques pas toujours identifiables sur le terrain, qui viennent nourrir le travail de recherche des archéologues et aider à implanter les fouilles.

De nouvelles pistes de traitement numériques des MNT sont ébauchées.

**ABSTRACT.** In the panel of non-invasive techniques, LiDAR airborne surveys by airplanes, helicopters or even satellites have, for several decades, proved their utility in the exploration of large wooded, forest or inaccessible sectors.

The miniaturization of the sensors made it possible to carry powerful LiDAR sensors under light civil UAVs, multirotors or fixed-wing drones. These microdrones can overcome the limitations and disadvantages of traditional aviation.

Archaeology has, of course, benefited from this technology, which is complementary to the LiDAR plane survey, the photogrammetry and even the terrestrial scanner survey.

Points clouds, shaded MNTs and 3D models reveal microtopographic artifacts that are not always identifiable in the field, which feeds archaeologists research work and helps to establish excavations.

New digital DTM treatment tracks are being drafted.

**MOTS-CLÉS.** drone, archéologie, LiDAR, microtopographie, topographie.

**KEYWORDS.** UAV, archaeology, topography, LiDAR, microtopography, 3D model.

Dans le panel des techniques non invasives, les prospections LiDAR aéroportées par avions, hélicoptères voire satellites ont, depuis plusieurs décennies, prouvé leur utilité dans l'exploration de grands secteurs boisés, forestiers ou inaccessibles.

La miniaturisation des capteurs (2010-12) a permis d'emporter des capteurs LiDAR performants sous des drones civils légers, multirotors (fig. 1) ou à voilure fixe (fig. 2). Ces microdrones permettent de dépasser les limites et inconvénients propres à l'aviation traditionnelle (Nicolas Poirier *et al*).

En réduisant les hauteurs de vol, augmentant d'autant la précision du résultat obtenu, cette adaptation a permis d'élargir le champ des applications possibles : topographie pour le génie civil, les carrières, les travaux publics, la surveillance des lignes à haute tension, les travaux forestiers, le suivi de l'érosion des côtes, l'implantation de parcs éoliens, l'étude de bassins versants, etc.

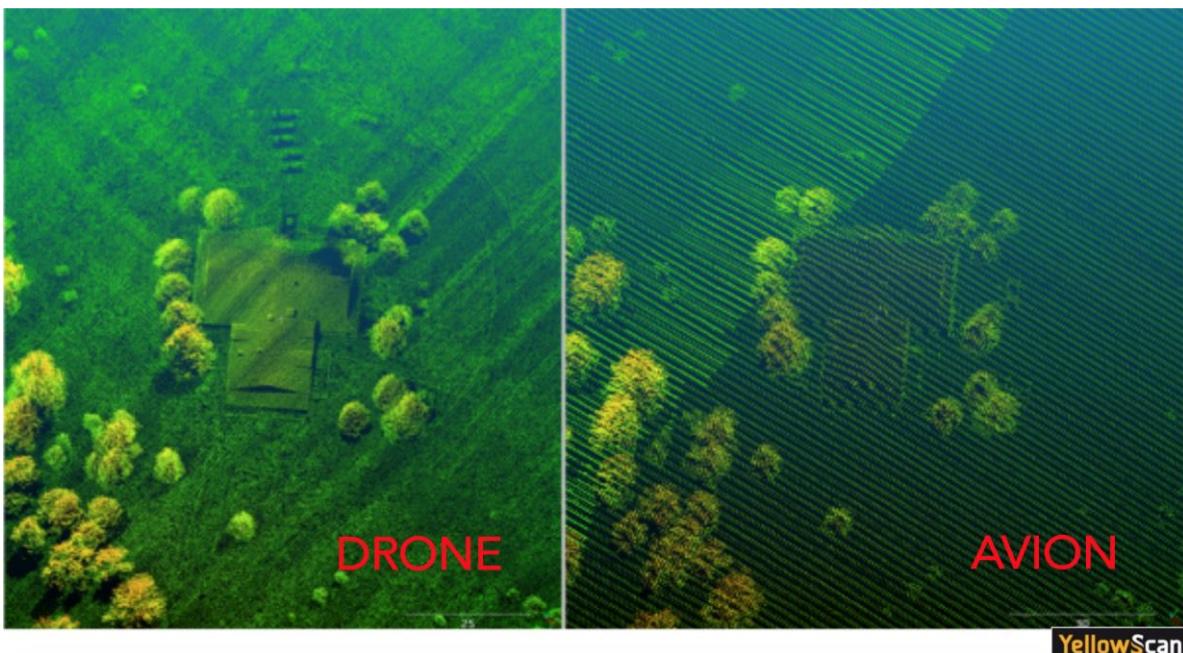


**Fig.1.** Drone de type hexacopter portant un capteur LiDAR (crédits AIRD'ECO-Drone)



**Fig.2.** Drone type aile fixe portant un capteur LiDAR (crédits YELLOWSCAN)

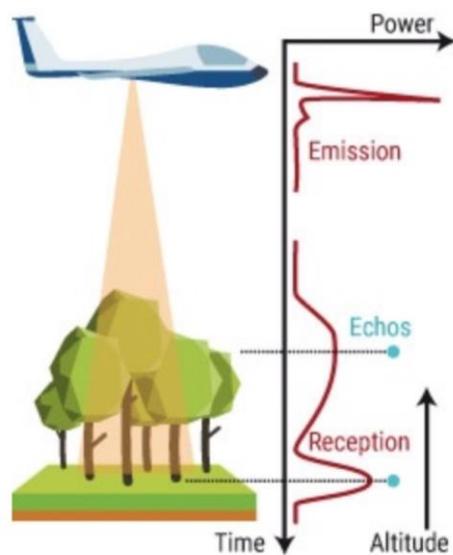
L’archéologie a bien sûr bénéficié de cette technologie qui s’avère complémentaire du relevé LiDAR par avion. La figure 3 compare un même élément archéologique enregistré par drone et par avion et précise les différentes caractéristiques de ces deux techniques. Le LiDAR par drone, plus souple à mettre en œuvre, permet d’obtenir plus de points par  $m^2$ , pour des petites surfaces, donc une plus grande précision des cartes rendues avec un coût inférieur. Il sera plus adapté à la caractérisation de sites pressentis ou connus. Le LiDAR par avion reste incontournable pour explorer des grandes surfaces, dont la précision requise est moindre.



**Fig.3.** Comparaison nuage de points LiDAR drone et avion (crédits AIRD'ECO-Drone)

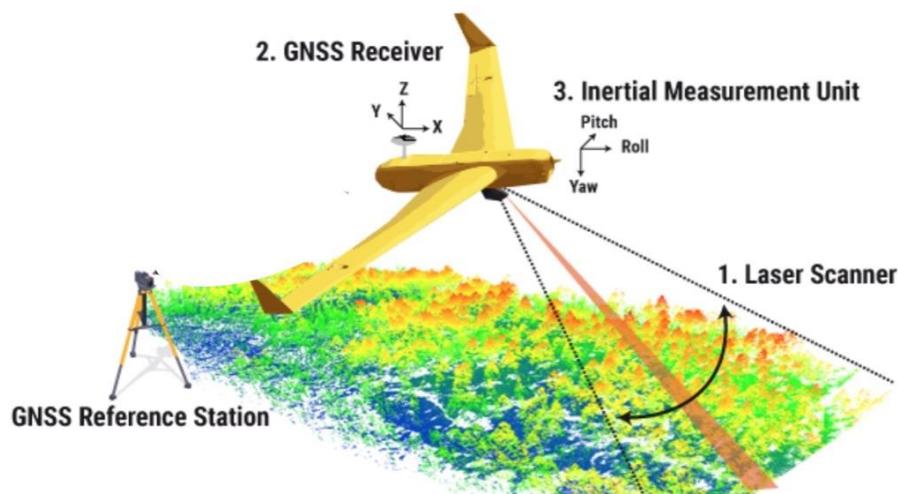
## Principe de la méthode

La détection et la télémétrie de la lumière (**Light Detection And Ranging**) est une technologie de télédétection à base de laser qui va permettre de générer un nuage de points 3D géoréférencé<sup>1</sup>. Les ondes laser sont réfléchies non seulement par le sol mais aussi par les arbres et tout objet au-dessus du sol. À la manière d'un « ricochet », les ondes laser vont s'immiscer entre les obstacles (arbres, végétation...), atteindre le sol avant d'être rétrodiffusées vers le drone (fig. 4).



**Fig.4.** Principe de la méthode (crédits YELLOWSCAN)

Ce calcul intègre les positions et orientations absolues du capteur. Les systèmes mondiaux de navigation par satellite (**GNSS**) fournissent des informations géographiques exactes concernant la position du capteur (latitude, longitude, hauteur) et l'unité de mesure inertielle (**IMU**) définit à cet endroit l'orientation précise du capteur (tangage, roulis, lacet). Les données enregistrées par ces deux appareils sont ensuite utilisées pour générer des données en points statiques : la base du nuage de points (fig. 5).



**Fig.5.** Systèmes de localisation (crédits YELLOWSCAN)

<sup>1</sup> Voir par exemple : <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works>

## Matériel, mise en œuvre

Cet article présente des résultats obtenus à l'aide de capteurs LiDAR de marque YellowScan à titre d'exemple. Le modèle utilisé est principalement le SURVEYOR embarqué sous un drone hexacopter dont les principales caractéristiques apparaissent en figure 6. Il est important de souligner que cet appareil est capable de capturer 600 000 points par seconde à 360° avec une portée maximale de 80 mètres. La précision de la mesure est donnée pour 5 cm en moyenne. Le drone « porteur » est homologué pour permettre des vols à vue en agglomération ainsi que des vols hors vue jusqu'à un kilomètre du point de décollage. L'antenne RTK au sol est classique et utilisée en post-traitement pour couvrir une surface de 5 km de rayon autour de la zone de mesure.

|   |  |  |
|---|--|--|
|    |    |   |
| <b>DPS6 – Big Lift (homologué S1,S2,S3)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Technologie DJI – A3</li><li>✓ Poids vide: 4 kg</li><li>✓ Parachute: 360g (S3)</li><li>✓ Lipos: 1,7 à 2,05 kg</li><li>✓ Autorisé 7,6 kg (S3)</li><li>✓ Poids capteur : 1,5 kg (3 kg max en S3)</li><li>✓ Autonomie: 15-20mn</li></ul> | <b>SURVEYOR YellowScan</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Velodyne VLP16</li><li>✓ IMU: Applanix 15</li><li>✓ Poids 1,5 kg + antenne</li><li>✓ 3 à 5 cm de précision</li><li>✓ 300 000 impact/s</li><li>✓ Balayage scanner 360°</li><li>✓ 80 m de portée max.</li></ul> | <b>GNSS SPECTRA SP60</b> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ Antenne GNSS</li><li>✓ Post-traitement</li><li>✓ Rayon 5 km, 3H</li></ul> |

**Fig.6. Equipment utilisé (crédits AIRD'ECO-Drone)**

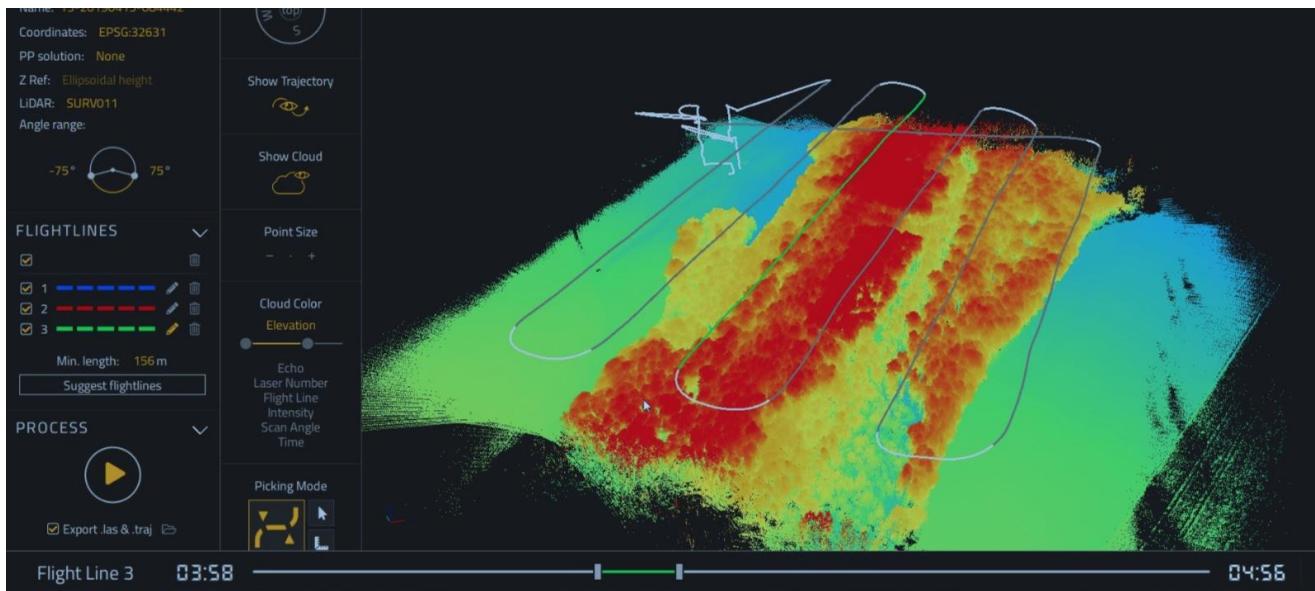
Le déploiement sur le terrain est assez simple. Deux personnes sont nécessaires pour assurer les mesures et la sécurité de l'opération. Après s'être assuré d'avoir toutes les autorisations aéronautiques et/ou préfectorales en fonction de l'emplacement des vols envisagés, l'antenne RTK est tout d'abord positionnée au plus près du lieu de prospection, dans un endroit dégagé (clairière, zone de végétation la plus basse...) et laissée en place le temps des vols et pour une durée minimale de trois heures. Celle-ci permet un géoréférencement centimétrique des points du nuage obtenu.

Les zones de décollage et de vol, le cas échéant, sont sécurisées. Le drone est préparé et contrôlé. Les plans de vol automatiques sont ajustés pour couvrir la zone et respecter des recouvrements de données suffisants entre les différents vols.

Les vols sont réalisés à une altitude de 20 à 60 mètres au-dessus du sol (possibilité d'ajuster les hauteurs de vols par rapport à un Modèle Numérique de Terrain [MNT] intégré dans le logiciel de programmation des vols). La vitesse moyenne de vol est de 4 m/s. Hauteur de vol, passes croisées, vitesse, écartement des lignes de vols sont autant de paramètres que le télépilote peut ajuster afin d'obtenir la précision requise en fonction de la densité du couvert végétal.

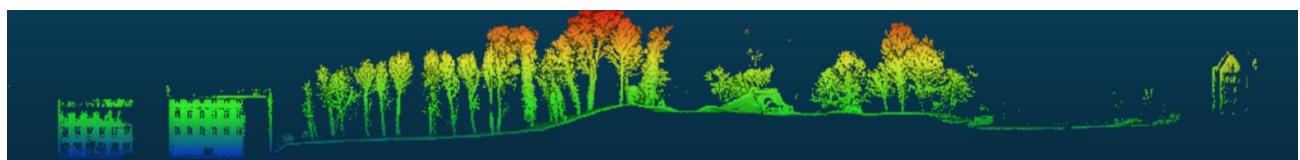
Lorsqu'il n'y a pas d'« urgence » à intervenir sur un chantier archéologique en milieu boisé, il est préférable d'attendre la chute des feuilles (en France, les périodes allant de décembre à avril sont les plus propices) car les ondes lumineuses seront plus nombreuses à traverser la canopée. Nous réalisons des prospections LiDAR tout au long de l'année, sur toutes sortes de cultures et arbres pour établir des plans topographiques avec des résultats très satisfaisants pour une précision finale de 2 à 15 cm. Nous avons également réalisé des couvertures LiDAR pour l'archéologie dans le maquis méditerranéen (Vaucluse) au mois de septembre qui ont permis de déceler des structures archéologiques intéressantes, comme un tumulus, un mur d'enceinte.

C'est sur le terrain, à l'issue des vols, que nous dépoillons les données, calculons un nuage de points brut (fig. 7) dans lequel nous réalisons des coupes transversales (fig. 8) et que nous évaluons si nous avons obtenu suffisamment de points sol pour la mission concernée. Au cas où il y aurait trop de lacunes, nous empêchent d'atteindre la précision requise, nous reprogrammons des vols ciblés dans la zone concernée. Les vols et fichiers de points supplémentaires produits viendront s'ajouter à ceux déjà obtenus.



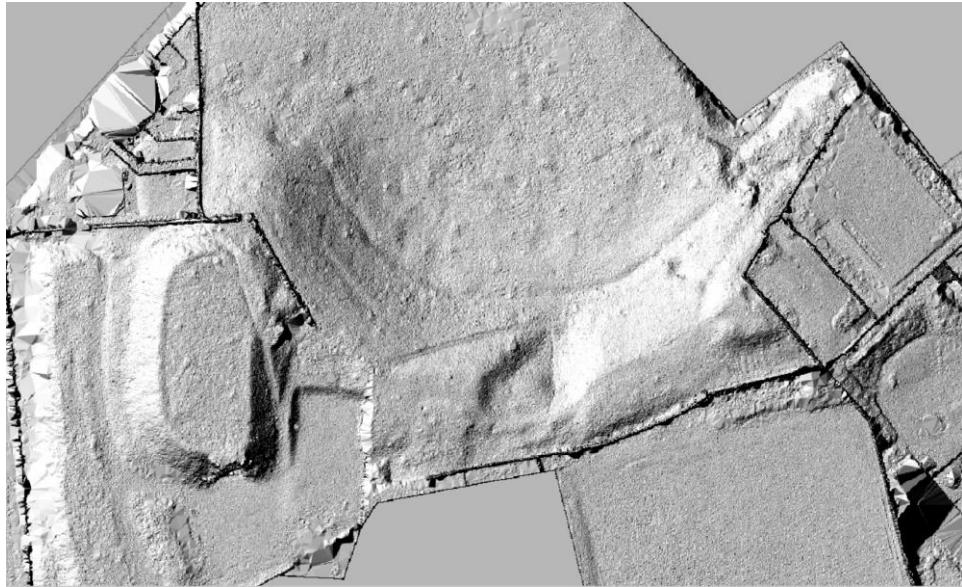
**Fig.7.** Nuage de points brut calculé par YS CloudStation (crédits AIRD'ECO-Drone)

Pour information, nous sommes en mesure de calculer un nuage de point « allégé » et le visualiser sur un ordinateur portable de terrain, de façon synchrone avec l'enregistrement du drone (logiciel YS LifeStation). Ceci peut être utile à titre de démonstration. Nous avons parfois recours à ce logiciel afin de « relire » les vols après atterrissage.

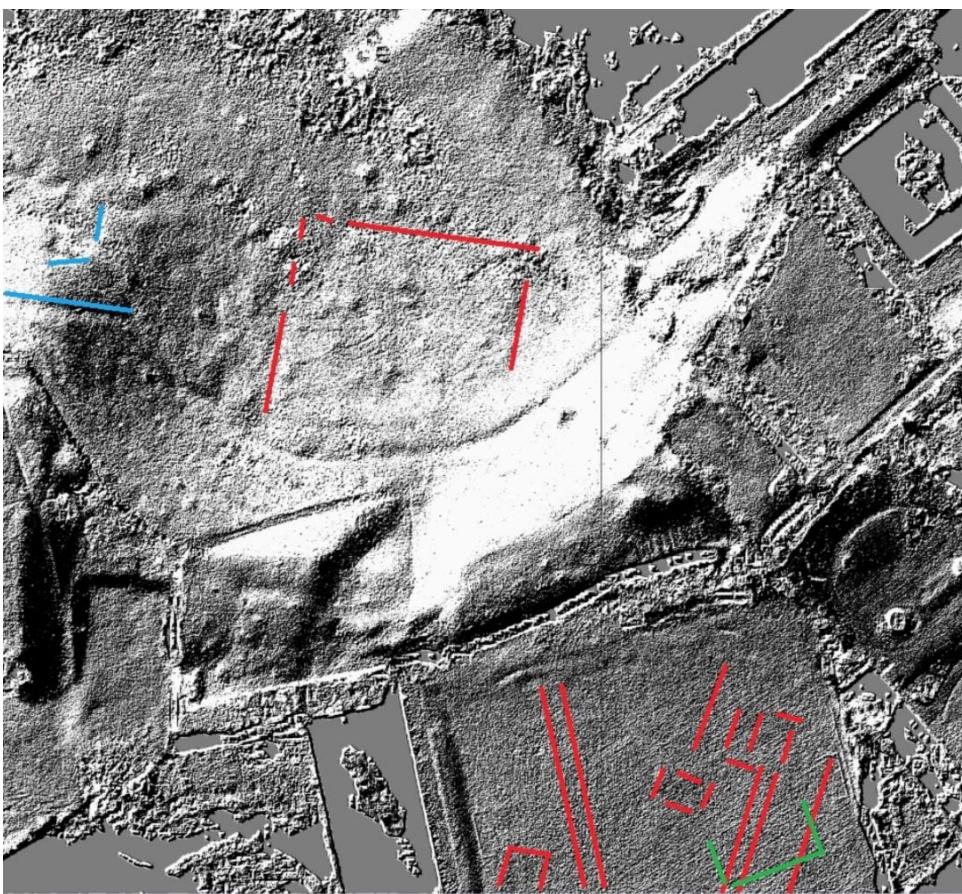


**Fig.8.** Coupe transversale dans un nuage de points colorisé selon z (crédits AIRD'ECO-Drone)

Les positions des échos enregistrés par le capteur sont sous la forme « identifiant, x, y, z ». Il convient donc de post-traiter ces milliers de données afin de visualiser le nuage de points (fig. 7). Un premier logiciel (POSPac de Trimble) optimise et géoréférence les trajectoires du drone avec les enregistrements de l'IMU et de l'antenne sol RTK utilisée comme station de référence. Un deuxième logiciel (CloudStation de YellowScan) permet de calculer les nuages de points pour chaque ligne de vol dans le système géographique choisi. Enfin, une suite logicielle propre à la donnée LiDAR permet de caler les lignes de vol, filtrer le bruit, et classifier le nuage de points. Celui-ci peut alors être utilisé classiquement en 2D ou 3D. Pour détecter des structures archéologiques, l'ombrage du MNT apparaît comme incontournable (fig. 9). Un très récent essai de traitement numérique non linéaire du MNT (fig. 10) breveté par l'université de Brest, a fait apparaître des structures non visibles jusque-là. Ce test montre que les données que nous enregistrons pourront être traitées dans le but de détecter de nouvelles structures qui pourront être vérifiées sur le terrain.

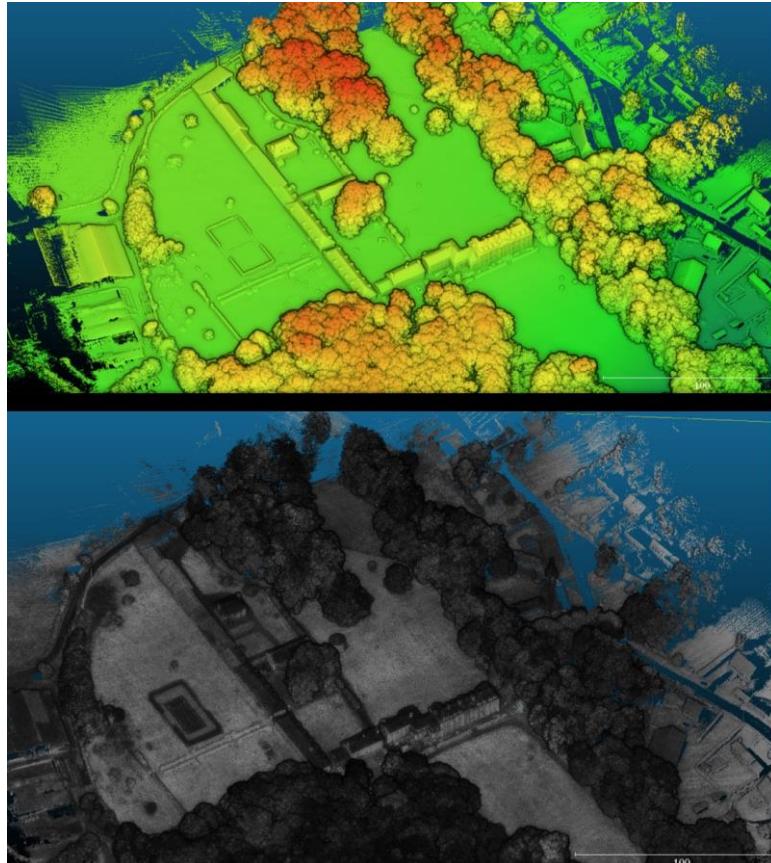


**Fig.9.** MNT ombré du théâtre de Soissons (crédits AIRD'ECO-Drone)

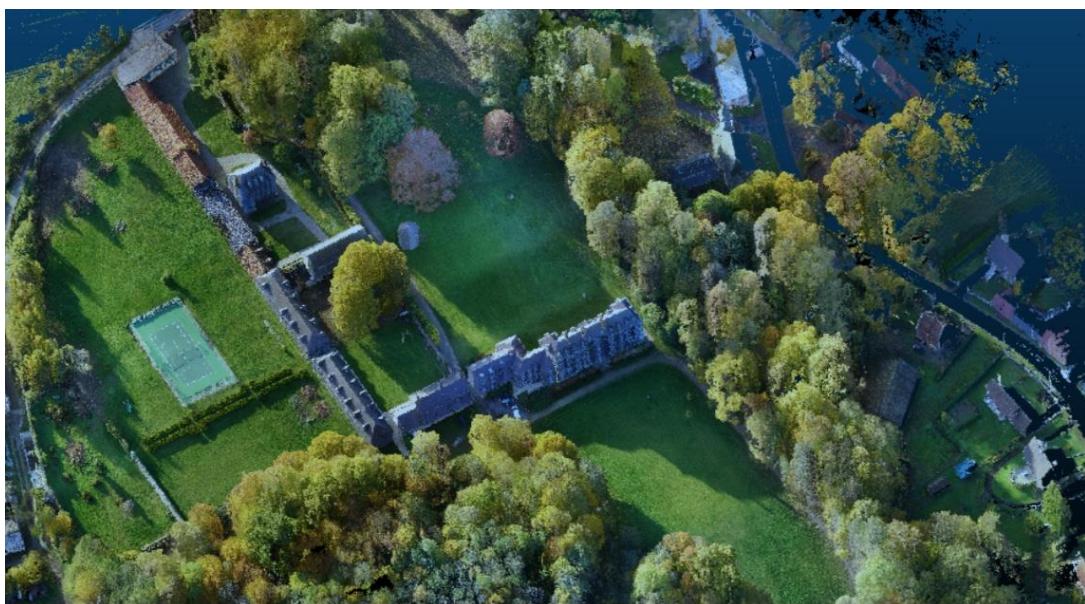


**Fig.10.** MNT du théâtre de Soissons avec traitement numérique non linéaire (crédits AIRD'ECO-Drone)

La visualisation du nuage de points LiDAR, classiquement colorisé selon z ou en fonction de la densité (fig. 11), peut être améliorée par la colorisation photo-réaliste du nuage de points. Les mesures du scanner peuvent être combinées aux méthodes de photogrammétrie ou à des orthophotographies pour améliorer la qualité et le rendu des nuages de points (fig. 12). Lorsque le terrain n'est pas exclusivement recouvert de forêt, cela améliore l'esthétisme et le repérage.



**Fig.11.** Nuage de points LiDAR colorisé selon z, et selon intensité (crédits AIRD'ECO-Drone)

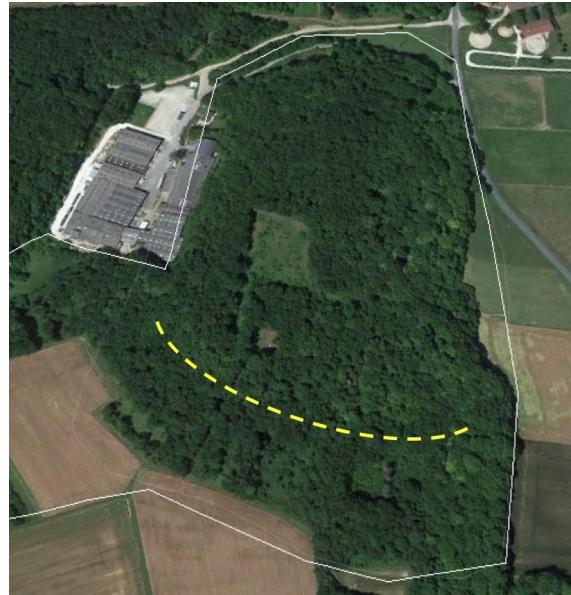


**Fig.12.** Nuage de points LiDAR colorisé avec une orthophotographie (crédits AIRD'ECO-Drone)

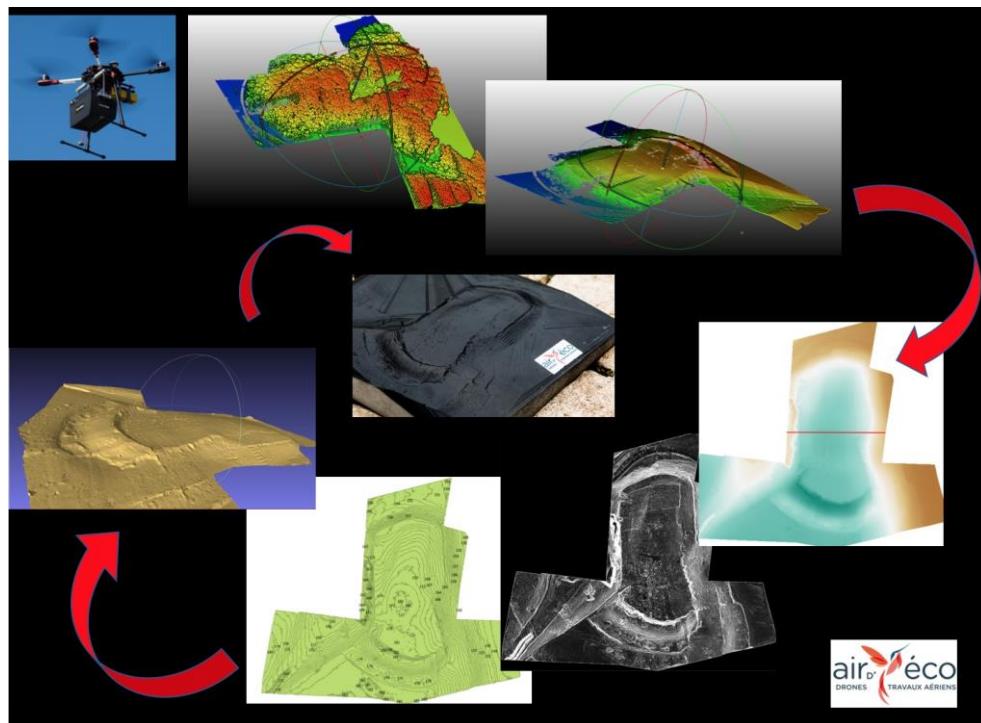
Voici quelques exemples de résultats choisis pour leur diversité et que nous avons été autorisés à présenter.

**L'oppidum de Changé à Saint Piat** (28), sur la rive droite de l'Eure, surplombe une zone de sépultures néolithiques à mérovingiennes qui ont fait l'objet de nombreuses fouilles (Heitz, Jagu 2017 ; Heitz 2018). Cet oppidum de 5,5 hectares (fig. 13) est recouvert d'arbres allant jusqu'à 30 m de haut et le rempart de 250 m de long est envahi de buissons de buis très épais. Les associations locales (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 regroupés sous la bannière du CAEL, Comité

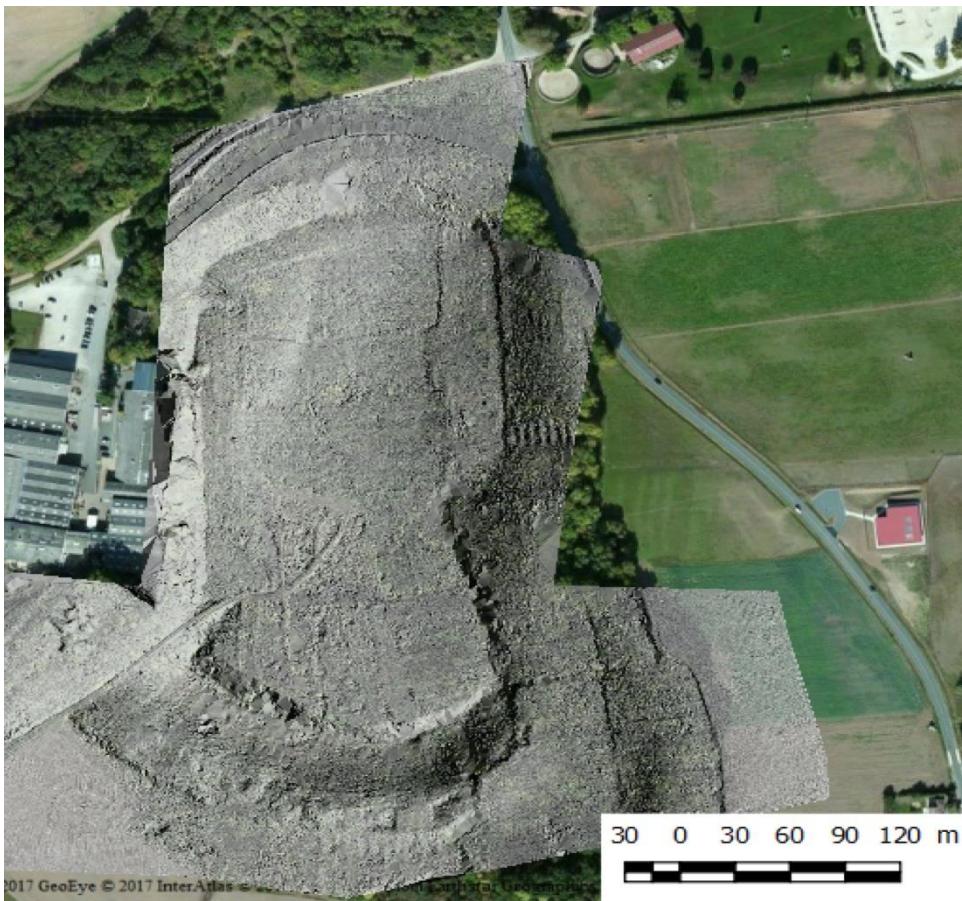
archéologique d'Eure-et-Loir) ont organisé la prospection LiDAR de ce site (Heitz, Jagu 2017). Les vols ont couvert 10 hectares afin d'avoir le contexte du site. La figure 14 résume les documents obtenus : nuage de points, MNT, modèle 3D et maquette résine (réalisation de la société I3DP, Eure-et-Loir). Le MNT ombré (fig. 15) a permis de préciser deux entrées de l'oppidum avec coins rentrants, des murets, les limites cadastrales actuelles et anciennes avec probablement les traces d'un bâti très ancien au nord du site (fig. 16), ainsi que des terrasses d'une quinzaine de mètres sur le talus. Il est à noter que sur le terrain, le sol apparaît « perturbé », mais qu'en aucun cas, on ne peut entrevoir la régularité de ces formes.



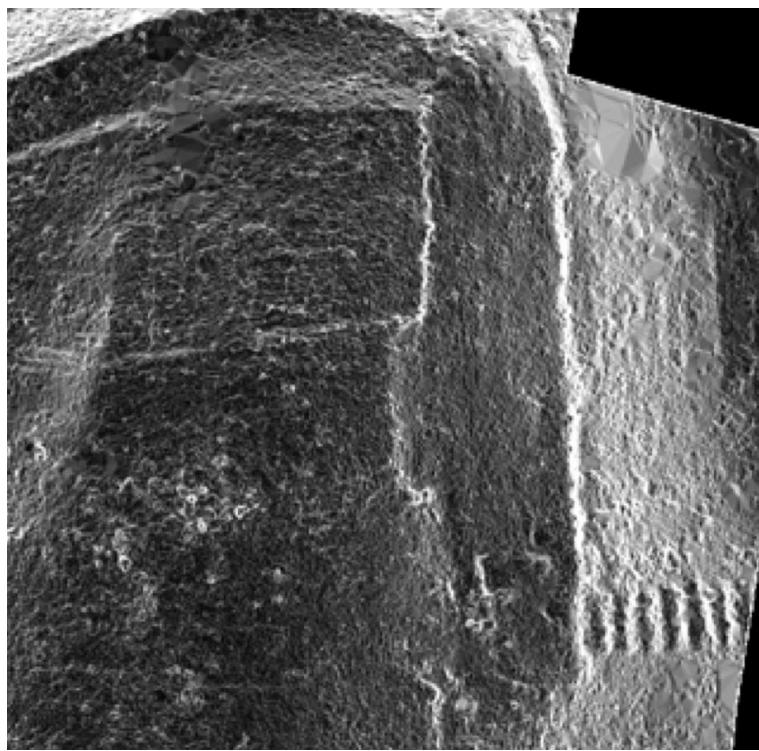
**Fig.13.** Oppidum de Changé boisé (« Camp de César ») (crédits AIRD'ECO-Drone)



**Fig.14.** Résumé des traitements réalisés à Changé (crédits AIRD'ECO-Drone)



**Fig.15.** MNT ombré de Changé sur fond Google Earth (crédits AIRD'ECO-Drone)



**Fig.16.** Détail du MNT de Changé (bâti ancien, terrasses) (crédits AIRD'ECO-Drone)

La maquette 3D issue du nuage de points LiDAR a été réalisée en résine à l'échelle 1/1000 à l'aide d'une imprimante de marque 3DSYSTEM, MJP2500+ (précision de réalisation de l'ordre du micron). Cette maquette a permis de préciser la géométrie d'un muret d'environ 2 mètres d'élévation, partiellement masqué sous d'épais buis au sommet du rempart. Il est nettement identifiable (fig. 17) sur la maquette alors qu'il n'apparaissait pas bien sur le MNT ombré. La prospection LiDAR de l'oppidum

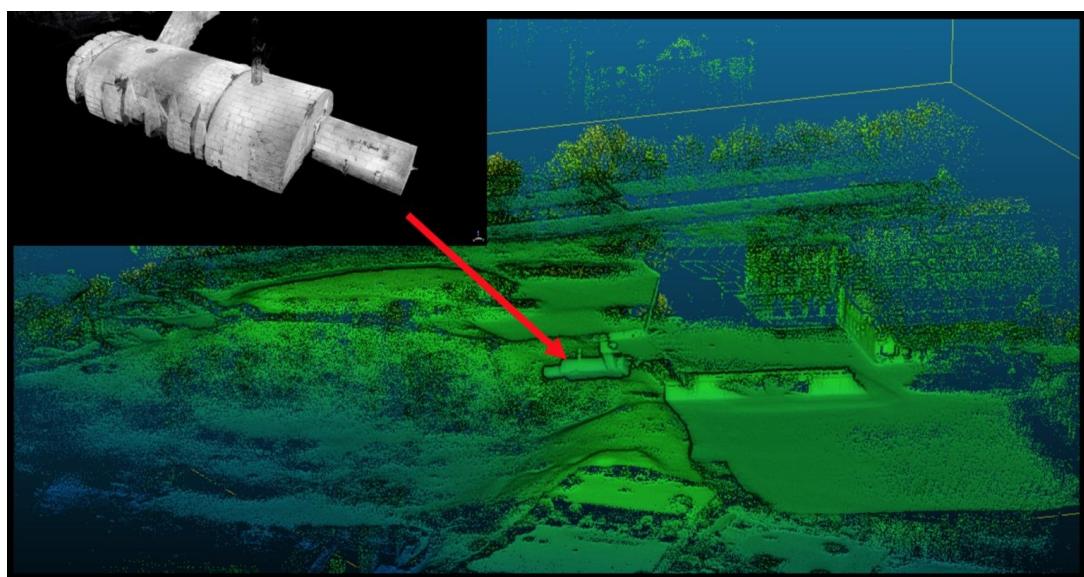
boisé de Changé a permis de relancer l'intérêt pour ce site, en profitant des résultats acquis pour réaliser une vidéo dans laquelle s'expriment tous les acteurs autour de cette étude<sup>2</sup>. Un parcours de visite pédagogique du site a été aménagé depuis, rendant accessibles au public les résultats scientifiques obtenus.



**Fig.17.** Muret visible sur la maquette 3D imprimée en résine (crédits AIRD'ECO-Drone)

**Au centre-ville de Soissons** (02), la prospection LiDAR a été un temps fort des investigations menées sur l'emprise boisée du théâtre antique de Soissons et du secteur bâti de Saint-Jean-des-Vignes, dans le cadre du projet AuguSTha, projet CNRS et Institut OPUS (Observatoire des Patrimoines de Sorbonne Université).

Ce théâtre constitue aujourd’hui un exemple unique d’édifice de spectacle en contexte urbain qui non seulement a été épargné, mais reste pleinement accessible à l’investigation, ce qui permet d’envisager une étude complète du monument, de sa construction à son abandon, et de comprendre son statut au sein de la ville de Soissons.

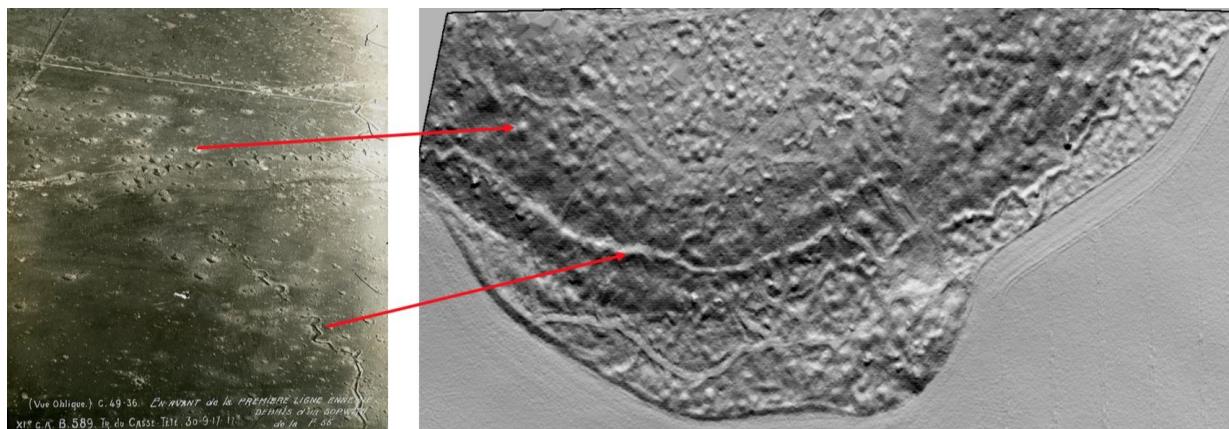


**Fig.18.** Ajout de la galerie numérisée 3D sous le nuage de points LiDAR drone de Soissons (crédits AIRD'ECO-Drone et PLEMO3D)

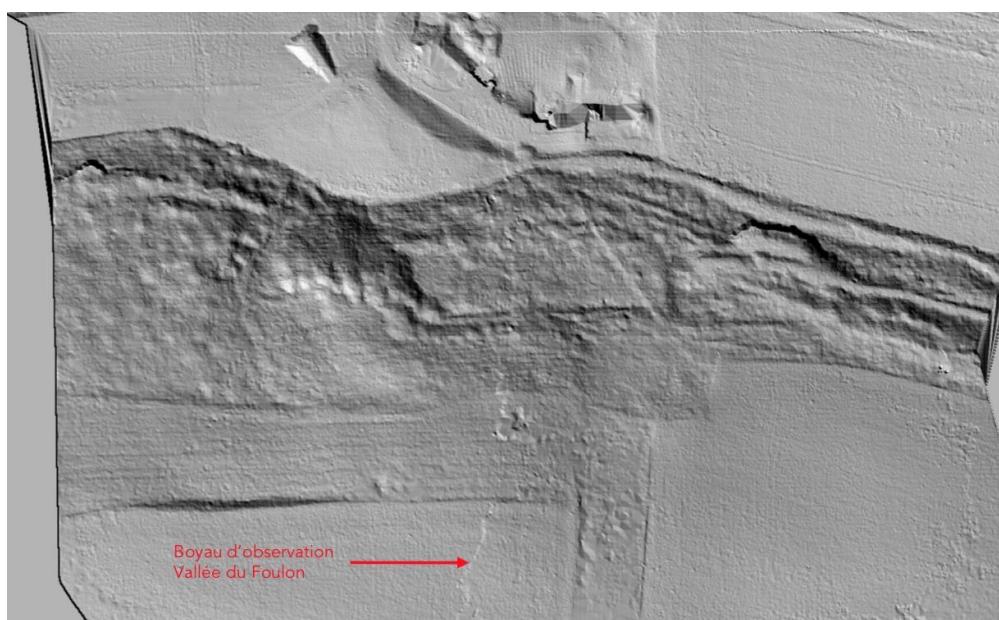
<sup>2</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=5hX12U1gsSU&feature=youtu.be>

L'objectif du LiDAR était de positionner les différents éléments encore en place pour mieux les comprendre. Le MNT ombré (fig. 9) a permis d'établir un plan topographique général du site où ont été reportés les résultats de la prospection géophysique par radar et toutes les composantes du terrain connues à ce jour. Au niveau de l'enceinte extérieure de la *cavea* du théâtre, une cave d'une vingtaine de mètres de long a fait l'objet d'un relevé scanner. Le nuage de points produit a été additionné au nuage de points LiDAR (fig. 18, le nuage est vu du dessous). Ceci a permis aux archéologues, entre autres, de calculer l'angle de la galerie par rapport au rayon du théâtre et de dire que cette galerie fait bien partie de sa structure, version corroborée par de récentes fouilles dans la galerie (Camerlynck *et al.* 2019).

**Au Chemin des Dames** sur la commune de Craonne (02), le Département de l'Aisne a souhaité effectuer la couverture LiDAR du secteur de la Caverne du Dragon sur le Chemin des Dames, comportant la crête et deux talus boisés d'une quarantaine de mètres de part et d'autre. La pente au nord n'a jamais été déminée (zone rouge). La signature LiDAR des deux zones est bien distincte : au nord (fig. 19), s'observent les trous d'obus et les tranchées bien reconnaissables que l'on peut rapprocher des photos de 1917, chaque tranchée pouvant ainsi être nommée. Au sud (fig. 20), l'entrée de la caverne, des coursives et la voie Decauville, etc. sont aussi reconnaissables sous les arbres. Ici, le fait le plus notable est une tranchée axée nord-sud qui apparaît nettement au droit des bois au nord puis à découvert plus au sud. Les archéologues connaissaient l'existence de ce boyau d'observation qui reliait la caverne à la vallée, mais ils ne pouvaient la situer précisément sur le terrain. On parle couramment dans ce cas de « cryptorelief ».

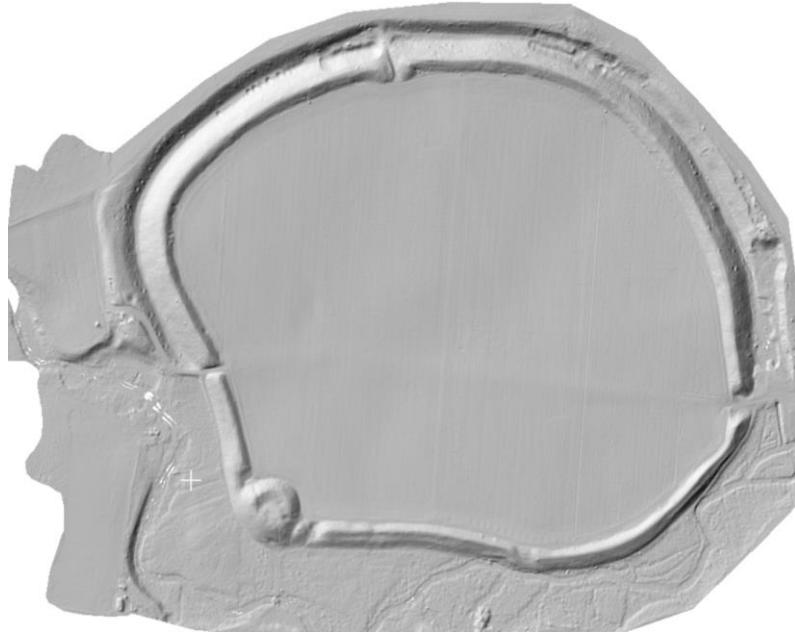


**Fig.19.** MNT de la pente nord au Chemin des Dames (crédits AIRD'ECO-Drone)



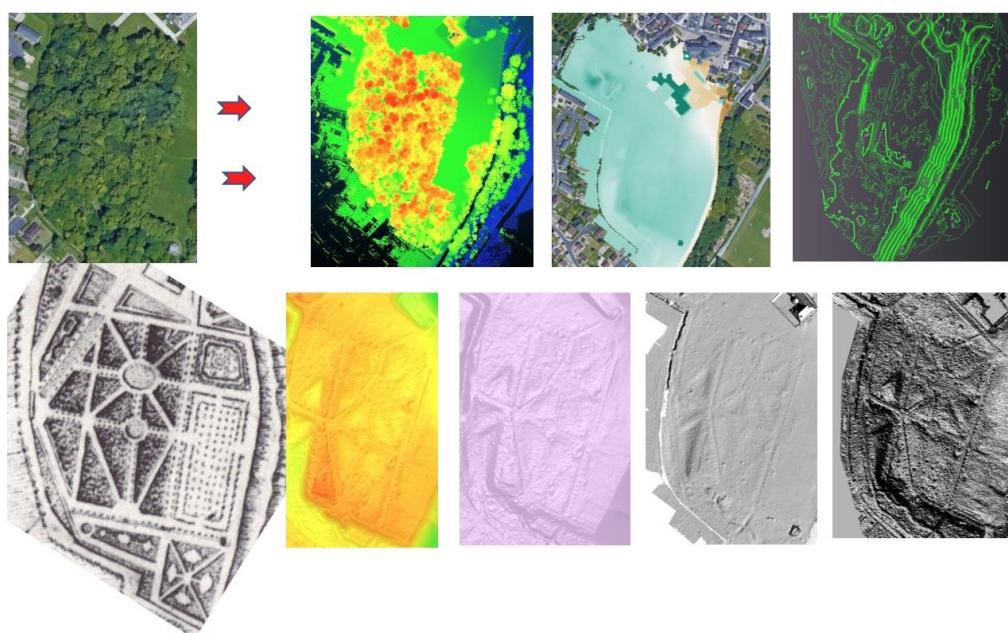
**Fig.20.** MNT de la pente sud au Chemin des Dames (crédits AIRD'ECO-Drone)

**L’enceinte celtique de La Cheppe** (51) délimite un périmètre fortifié de l’ordre de 30 hectares, siège d’un village reconnu par plusieurs fouilles. Ce double rempart de 7 m de haut est aujourd’hui boisé. La prospection LiDAR menée par l’association Autour du Camp d’Attila a permis d’avoir un plan topographique de l’ensemble (fig. 21), sur lequel peuvent être visualisés des linéaments dans la plaine, probablement liés au parcellaire du village, des structures proches de l’entrée et une suspicion de *castrum* dans la zone boisée, en cours de vérification sur le terrain. On notera au nord des marques d’explosions de munitions de la guerre de 1914-1918 dans le talus du rempart.



**Fig.21.** MNT ombré du Camp d’Attila (crédits AIRD’ECO-Drone)

À **Meung-sur-Loire** (45), le propriétaire du château mène une étude sur les jardins de son parc. Il a fait appel au LiDAR sous drone pour retrouver les traces des jardins à la française présents jusqu’à la Révolution et maintenant recouverts d’arbres. La figure 22 montre le nuage de points de cette zone boisée de quatre hectares environ, le MNT ombré et une extraction conservant la végétation basse faisant clairement apparaître le plan de ces jardins avec allées et bassins, à l’identique d’une gravure de 1781, alors que sur le terrain, ces traces n’apparaissent pas.



**Fig.22.** MNT ombré des bois du château de Meung-sur-Loire (crédits AIRD’ECO-Drone)

Pour finir, une portion remarquable du **Canal Louis XIV** (Berchères-La-Maingot, 28) est en cours d'étude, là où le canal commence son tracé en surélévation sur un remblai de 17 mètres de hauteur totalement boisé. Le MNT ombré (fig. 23) fait apparaître très clairement la rectitude du canal ainsi que les affouillements réalisés pour la construction du remblai de part et d'autre de celui-ci. Le projet de modélisation de l'ensemble hors-sol et souterrains (deux siphons pour passage d'une petite vallée et une galerie de 160 mètres de long au pied du remblai) permettra de mieux appréhender le fonctionnement de ces ouvrages conçus entre autres par Vauban, de réaliser des cubatures et d'aider à la mise en valeur touristique et pédagogique du lieu.



**Fig.23.** MNT ombré du Canal Louis XIV (crédits AIRD'ECO-Drone)

Ces exemples montrent clairement l'intérêt du LiDAR pour fournir un plan microtopographique de sites archéologiques de taille moyenne (4 à 40 hectares pour les exemples cités dans cette publication). Tous ces exemples ont été prospectés sur le terrain en une journée maximum et ont nécessité environ une semaine de traitement et mise en forme pour le rendu des résultats finaux. Le temps de mesure en forêt dépend vraiment des accès, de la visibilité que l'on peut avoir du drone en vol, sachant que l'on peut couvrir approximativement 20 hectares par jour dans un contexte classique favorable.

La précision dépendra de la pénétration des ondes lumineuses dans la canopée. Le cas général souhaité par les archéologues est d'avoir un relevé le « plus précis possible » afin de détecter des objets de taille décimétriques le cas échéant.

Il est étonnant de constater que le sol garde tant de traces du passé, même infimes, peu ou pas visibles sur le terrain, à cause de la végétation ou de leur faible amplitude. Le LiDAR aéroporté sous drone et le traitement 3D des résultats obtenus, prouvent une réelle adéquation avec la taille et la précision requise par les études archéologiques.

## Bibliographie

- Poirier, N., F. Hautefeuille, C. Calastrenc 2017 « L'utilisation des micro-drones pour la prospection archéologique à basse altitude », Revue française de photogrammétrie et de télédétection, 213-214 : 81-94.
- Heitz, I., D. Jagu 2017. « Modélisation d'un oppidum sous couvert végétal dense, en Eure-et-Loir, par LiDAR aéroporté par drone », Revue xyz, Association française de topographie (AFT), 153 : 45-50.
- Heitz, I. 2018. « Prospection LiDAR aéroportée par drone, Topographie des terrains boisés », Revue RGRA, 958 : 31-35.
- Camerlynck, C., G. Chaumet, F. Dugast, F. Ferreira, J.-F. Haquet, I. Heitz, L. Nya 2019. AugusSTHA – Augusta Suessionum : Théâtre Antique, Rapport d'étude OPUS (Observatoire des Patrimoines de Sorbonne Université), UMR8167 – Orient et Méditerranée, février.

Montagnon, M. 2019. « AIRD'ECO-Drone – Drone + LiDAR : Mettre au jour les traces du passé dans le sol », Revue TRAVAUX, 952, 22-30.

## Webographie

Présentation des principes du LiDAR sur le site de la société Yellowscan :

<https://www.yellowscan-lidar.com/fr/applications-and-users/how-lidar-works> (consulté le 26 décembre 2019)

Vidéo sur « Le Camp de César de Changé à Saint-Piat en Eure-et-Loir » :

<https://www.youtube.com/watch?v=5hX12U1gsSU&feature=youtu.be> (consulté le 26 décembre 2019)