

# LE LIDAR AÉROPORTÉ

## une méthode révolutionnaire pour l'archéologie

Murielle GEORGES-LEROY<sup>1-2</sup>

<sup>1</sup> Inspection des patrimoines, 6 rue des pyramides, 75041 Paris Cedex 01, France

<sup>2</sup> Laboratoire Chrono-Environnement, UMR 6249, Besançon, France

\*[murielle.leroy@culture.gouv.fr](mailto:murielle.leroy@culture.gouv.fr)

Début 2018, la presse française s'est largement fait l'écho de la découverte au milieu de la jungle, au Guatemala, d'un vaste réseau interconnecté de cités mayas sur plus de 2000 km<sup>2</sup>, grâce à une technologie de télédétection laser appelée laser scanner aéroporté ou lidar. Cette découverte est l'occasion de faire un point sur l'utilisation depuis plus de 15 ans de cette méthode en archéologie.

Si la découverte de ces anciennes cités mayas a fait grand bruit dans le monde, en donnant un éclairage sur la technologie lidar, l'usage de celle-ci n'est toutefois pas récent en archéologie. Elle a en effet été mise en œuvre dès 2001 sur l'emblématique site de Stonehenge en Angleterre et, au fil des améliorations techniques, son usage en archéologie s'est largement développé à partir des années 2005-2006. Dès 2009, des cités mayas localisées dans la jungle au Belize ont été survolées et en 2012, un vol lidar sur le site d'Angkor au Cambodge a révélé un vaste réseau urbain conservé sous forêt, mais aussi les vestiges de la première capitale khmer à Mahendraparvata. Avec le vol du Guatemala on a encore franchi un cap dans l'exploration, puisque l'objectif du projet est de prospecter plus de 14 000 km<sup>2</sup> en trois ans.

Le lidar, acronyme de *light detection and ranging*, est une méthode de télédétection active à impulsion laser (voir encart). Dans ses applications terrestres, fondées sur une mesure

de distance, elle sert en particulier à réaliser des levés topographiques en trois dimensions de surfaces naturelles ou construites. Il existe deux modes d'acquisition principaux : soit par une station terrestre (TLS - *terrestrial laser scanning*) soit par un système aéroporté (avion, hélicoptère, drone) appelé ALS (*airborne laser scanning*). Les applications topographiques du lidar aéroporté couvrent des domaines variés : géologie, sismologie, travaux publics, surveillance des risques naturels, mais aussi, bien sûr, archéologie, où le lidar est utilisé pour la détection et la cartographie des sites.

### Un modèle numérique de terrain de grande précision

Le principe de cette technologie consiste en un survol à basse altitude de la zone d'étude à l'aide d'un système aéroporté équipé d'une source laser qui balaye très rapidement les surfaces au sol, par bandes de quelques centaines de mètres de largeur [1].

**ARDOP**  
INDUSTRIE



Vous aider à construire  
Votre futur

INDUSTRIE



Solutions  
standards

ENGINEERING



Projets  
customs

Spectral Solutions  
By Ardop



Spectromètres  
Compacts



Spectromètres  
FTIR



Caméra  
multispectrale



Caméra  
«Pushbroom»  
spectrale



Caméra Snapshot  
spectrale



Caméra Qalif  
spectro

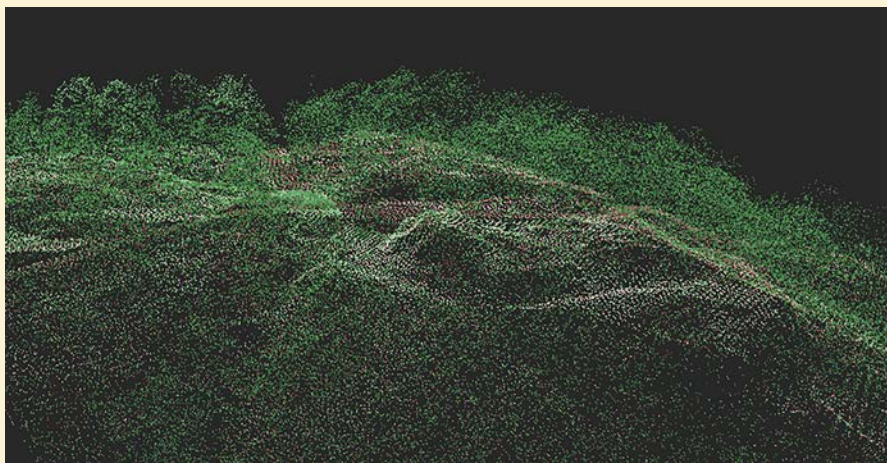


+ 33 6 49 54 52 94

[www.ardop.com](http://www.ardop.com)

[sales@ardop.com](mailto:sales@ardop.com)





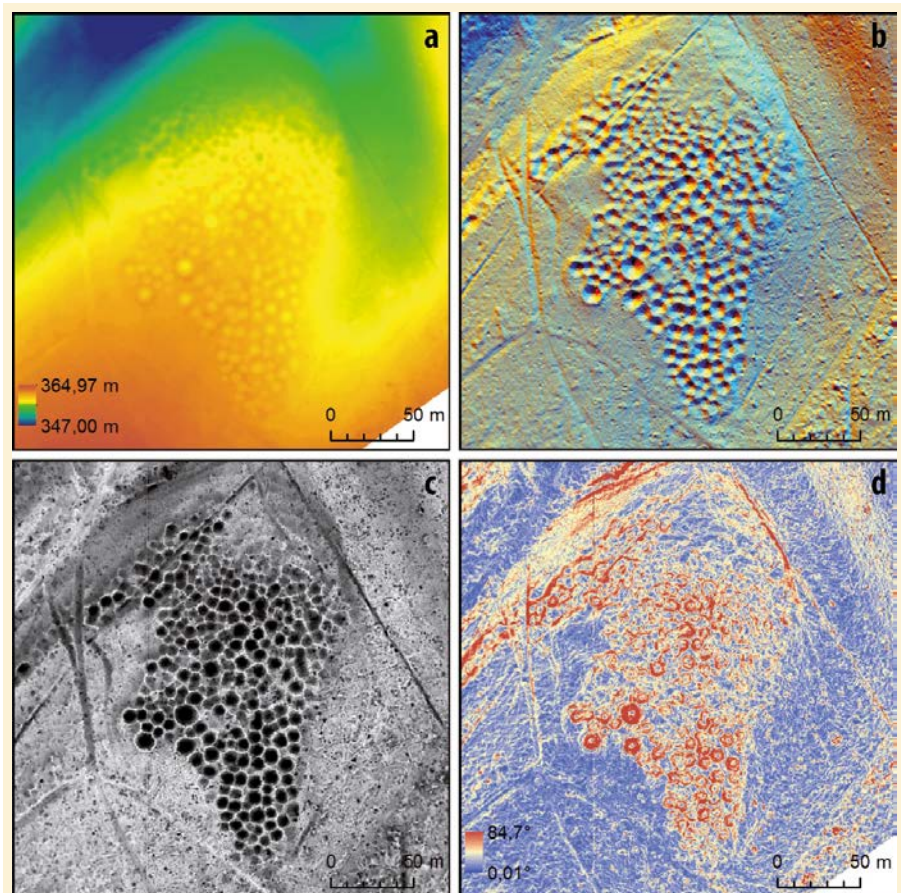
**Figure 1.** Visualisation axonométrique des échos lidar à l'emplacement des ruines du château médiéval de Frouard (en rose, points sol ; en vert, points sursol). (Données lidar Haye – DRAC Lorraine/INRA Nancy/ONF 2007)

Les rayons laser sont interceptés par le sol ou par les objets en sursol (végétation, bâtiments) et renvoyés en direction de l'avion où un capteur détecte l'intensité et le temps de retour du signal. Des systèmes de positionnement dans l'avion et au sol (GPSD, centrale inertielle) permettent de calculer la trajectoire de l'avion et d'en déduire la position des points d'impact avec une précision de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres. Comme une même impulsion lumineuse peut toucher la végétation puis le sol, les scanneurs enregistrent, selon les modèles, de deux à quatre échos (système multi-échos) ou le signal de retour en continu (système *full-waveform*). Dans les deux types de système, il en résulte une description précise du sol et des objets en sursol, sous la forme d'un « nuage de points » renseigné par des coordonnées  $x$ ,  $y$  et  $z$  (figure 1). Ce nuage de points fait ensuite l'objet d'une classification à l'aide d'algorithmes séparant les points ayant atteint le sol de ceux ayant touché la végétation ou d'autres objets. Plusieurs modèles numériques d'élévation (MNE) peuvent être élaborés à partir de ces points, la résolution (altimétrique et planimétrique) dépendant de la densité de points disponibles. Le plus utilisé en archéologie est le modèle numérique de terrain (MNT) construit à partir des points sol. Des traitements de visualisation en 2D (ombrages, pentes, illuminations plus ou moins

complexes) ou 3D peuvent alors être appliqués à ces données pour servir à l'analyse archéologique (figure 2).

L'intérêt de cette méthode pour l'étude des vestiges conservés sous couvert forestier est vite apparu pour les archéologues. Le milieu forestier

étant protecteur pour les vestiges, ceux-ci y sont conservés sous forme de micro-reliefs (buttes, talus, creux) et sont beaucoup moins perturbés ou érodés que dans les zones urbanisées ou cultivées. Mais ce milieu est contraignant à explorer : visibilité et accès entravés par la végétation, cartographie difficile à mettre en œuvre... La classification du nuage de points, qui isole les points sol, revient à effacer virtuellement la végétation ; la méthode permet donc de s'affranchir d'une partie de ces contraintes, tout en étant parfaitement adaptée à la révélation des reliefs. À l'inverse, les points ayant été interceptés par la végétation sont mobilisés par les forestiers pour divers usages : calcul de hauteur de la végétation, de la biomasse... Le lidar entraîne aussi un changement total d'échelle dans l'exploration en couvrant rapidement des surfaces considérables (des centaines de kilomètres carrés en quelques jours).



**Figure 2.** Minières d'extraction du minerai de fer. Différentes techniques de visualisation du MNT. (a) MNT coloré. (b) Ombrage multi-directionnel. (c) *Sky-view factor* (méthode ZRC-SAZU). (d) Pente. (Données lidar Haye – DRAC Lorraine/INRA Nancy/ONF 2007)



## La révélation de paysages anciens fossiles et de mutations dans l'occupation du sol

Au-delà des pyramides mayas ou des temples d'Angkor, le lidar révèle aussi des vestiges plus fugaces et modestes comme des structures agraires et parcellaires (talus, murets, tas d'épierrement, champs bombés...) ou des éléments de voirie. Souvent peu visibles au sol, même dans des forêts tempérées, ces vestiges permettent d'aller au-delà de la simple étude d'un site en reconstituant sur de vastes surfaces les paysages anciens au sein desquels il fonctionnait.

À titre d'illustration, on peut évoquer les recherches menées sur le massif forestier de Haye à côté de Nancy, en Meurthe-et-Moselle, qui a fait l'objet d'un des premiers levés lidar réalisés en France, durant l'hiver 2006-2007. Il a été acquis en appui d'un programme de recherche associant archéologues et chercheurs forestiers et portant sur l'impact des occupations anciennes sur la biodiversité forestière actuelle. Alors que ce massif était exploré depuis plusieurs années au sol, les résultats obtenus grâce au lidar ont considérablement renouvelé les connaissances en révélant un paysage « fossilisé » avec ses ensembles de champs et pâtures irrigués par un réseau de voies desservant près d'une centaine de fermes et habitats groupés gallo-romains (figure 3).

Le lidar a permis de compléter les levés de terrain, en détectant jusqu'à 4 fois plus de parcellaires anciens. De plus, les secteurs inaccessibles au sol ont pu être cartographiés, donnant une vision beaucoup plus dense et cohérente de ce paysage ancien. En fournissant des données sur la morphologie même du modèle des traces agraires formées par l'araire ou la charrue, le lidar a apporté des éléments décisifs sur la datation de ces traces, dont la majorité sont gallo-romaines, mais dont certaines sont médiévales. Il a ainsi été possible de restituer les fluctuations qu'a connues ce terroir depuis au moins 2000 ans. Ce plateau calcaire aujourd'hui couvert par un imposant massif forestier de 12 000 ha était presque entièrement défriché et mis en culture au I<sup>er</sup> s. de notre ère. Puis, la forêt a reconquis ces terres agricoles à la fin de l'époque gallo-romaine, vers le IV<sup>e</sup>-V<sup>e</sup> s., en connaissant une ou plusieurs phases de re-défrichement importantes dans quelques secteurs, probablement au cours du Moyen-Âge.

L'étude des sols de ces terroirs (analyses chimiques, études floristiques) montre un impact de ces occupations anciennes, avec par exemple des taux de phosphore plus importants à l'emplacement des fermes, le long des chemins empruntés par le bétail ou dans certaines zones cultivées et amendées par du fumier, mais aussi une flore particulière. Sans la connaissance de ces occupations anciennes appréhendées grâce au lidar, ces particularités ne seraient pas interprétables.

Au-delà de l'apport sur les sociétés passées, c'est bien la connaissance de notre environnement « naturel » qui est en jeu. La multiplication des vols lidar dans la moitié nord de la France montre que de nombreuses forêts recouvrent des zones entièrement défrichées et cultivées durant l'époque gallo-romaine et renouvelle la perception de ces forêts que l'on pensait immémoriales. Mais ces observations ne se limitent pas à la France. Les levés lidar des cités mayas du Guatemala ou

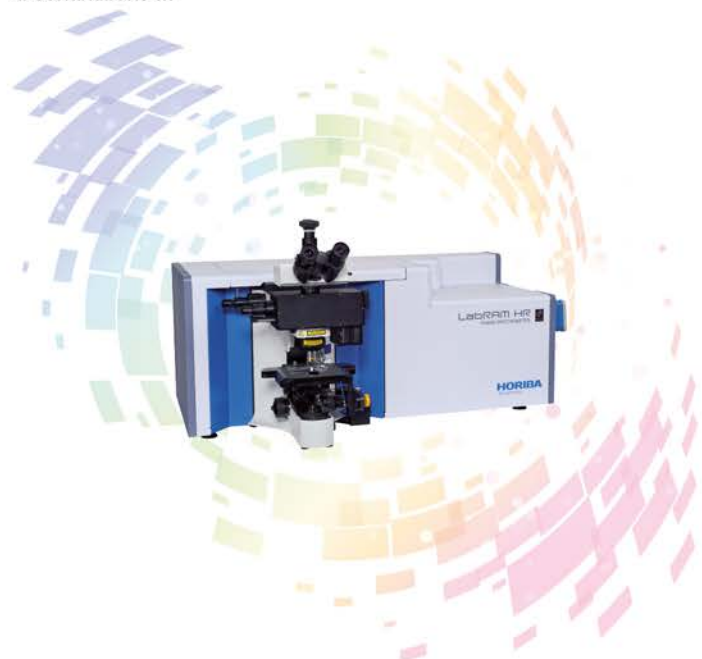


## LabRAM HR Evolution

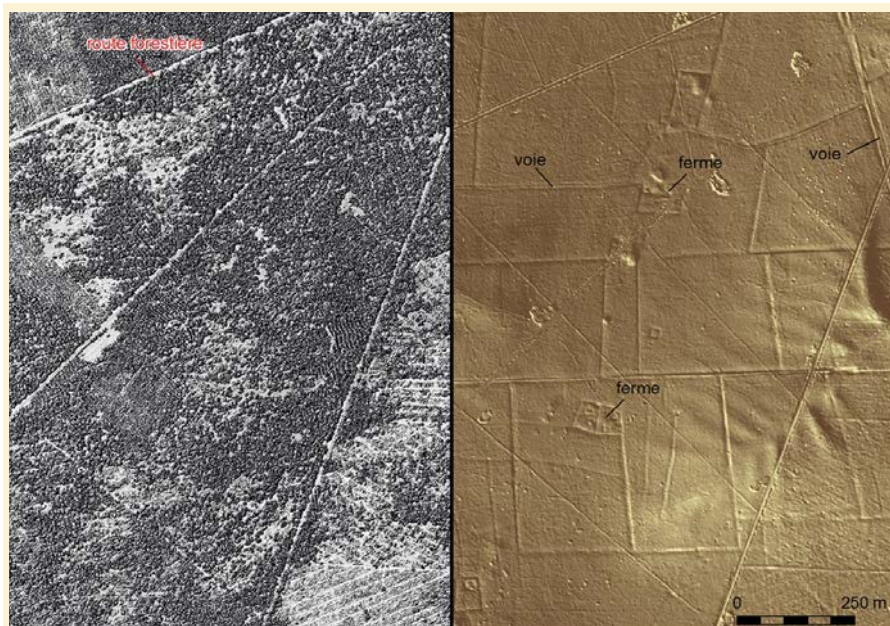
### La recherche Raman en toute simplicité !

- Imagerie confocale Raman ultra rapide
- Résolution spatiale limitée par la diffraction
- Résolution spectrale la plus élevée
- Large plage spectrale grâce à une conception achromatique unique
- Compatibilité avec plusieurs lasers et plusieurs détecteurs
- Système entièrement automatisé avec contrôle logiciel puissant

Instruments flexibles pour diverses applications, notamment : AFM-Raman et TERS, photoluminescence, chauffage et refroidissement d'échantillons ...







**Figure 3.** Paysage fossile gallo-romain en forêt de Haye. Visualisation par ombrage (a) du MNS (élaboré à partir des premiers échos renvoyés) et (b) du MNT (élaboré à partir des points sol). (Données lidar Haye – DRAC Lorraine/INRA Nancy/ONF 2007)

des cités khmers du Cambodge qui, en plus de nombreuses ruines de temples et de bâtiments, montrent des systèmes d'irrigation, des terrasses de culture ou des aménagements hydrauliques abandonnés témoignent aussi de profondes mutations dans l'occupation du sol.

### Des champs d'application multiples en archéologie

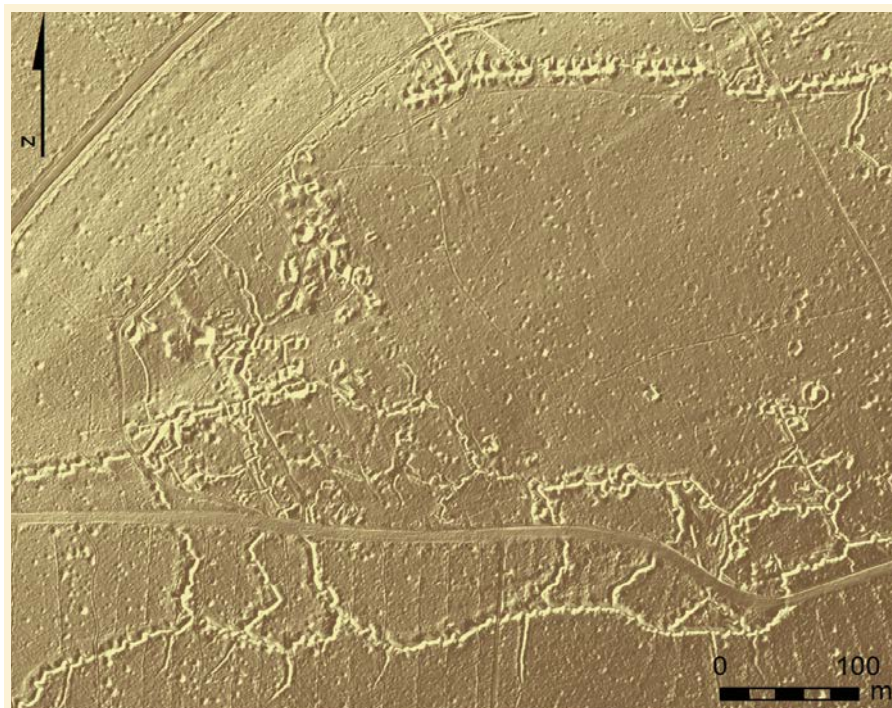
Autre exemple de vestiges étudiés récemment grâce au lidar, ceux des conflits des deux dernières guerres mondiales en Europe. La forêt de Verdun dans la Meuse, forêt plantée au sortir de la première guerre mondiale, à l'emplacement du champ de bataille de 1916, a ainsi fait l'objet d'une télédétection lidar en 2013 [2]. Les forts, tranchées, campements, les villages détruits ou les milliers d'impacts de bombes ressortent admirablement bien (figure 4). L'étude de ces « polymorphes » (reliefs et modelés nés de la guerre) a permis l'analyse fine du champ de bataille et a fourni une aide à sa protection. Mais le MNT a aussi été mobilisé dans l'analyse des conditions d'évolution et de préservation des vestiges de guerre depuis un siècle, en étudiant les phénomènes d'érosion et de colmatage qui les ont affectés.

De nombreux autres types de sites sont étudiés grâce au lidar : sites fortifiés, nécropoles de tumulus, carrières, minières, vestiges artisanaux (ateliers de production de fer, charbonnières), éléments des paysages anciens (paléochenaux)... Dans le Land du Bade-Wurtemberg en Allemagne, le service

archéologique a entrepris, à partir de 2009, l'inventaire systématique de l'ensemble des vestiges archéologiques détectables sur les levés lidar réalisés sur plus de 35 700 km<sup>2</sup> par le service du cadastre du Land. En 2015, 720 000 indices archéologiques avaient déjà été répertoriés sur 24 400 km<sup>2</sup>, en plus des 36 000 sites précédemment connus.

Mais l'utilisation du laser en archéologie ne se limite pas au lidar aéroporté. Le laser scanner est également couramment mis en œuvre dans des relevés au sol, pour étudier du bâti en élévation ou pour réaliser des modèles 3D de grottes ornées par exemple [3]. La grotte de Lascaux en Dordogne a ainsi fait l'objet d'un tel levé destiné à modéliser la cavité, afin de faire des simulations d'ordre climatique pour assurer au mieux sa conservation. Ces levés 3D, outre qu'ils constituent des outils d'étude et d'archivage, sont aussi utilisés pour la visite virtuelle de grottes ornées.

En pleine expansion dans le milieu archéologique, on peut affirmer que la technologie lidar y a produit une véritable révolution, comparable à celle du télescope spatial Hubble pour l'astronomie, selon les mots de Francisco Estrada-Belli de l'université de Tulane.



**Figure 4.** Visualisation par ombrage d'une installation d'artillerie de 1914 et de trous d'obus. (Données lidar Verdun – 55 – Forêt d'exception – DRAC Lorraine/ONF 2013)

## POUR EN SAVOIR PLUS

[1] M. Georges-Leroy, L. Nuninger, R. Opitz, *Lidar : technique de détection au service de l'archéologie*, Techniques de l'ingénieur, 2014.

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/la-science-au-service-de-l-art-et-du-patrimoine-42579210/lidar-technique-de-detection-au-service-de-l-archeologie-in215/>

[2] R. Matos-Machado, J.-P. Amat, G. Arnaud-Fassetta, F. Bétars, *Potentialités de l'outil LiDAR pour cartographier les vestiges de la Grande Guerre en milieu intra-forestier (bois des Caures, forêt domaniale de Verdun, Meuse)*, EchoGéo, 38, 2016.

<http://echogeo.revues.org/14791>

[3] G. Pinçon, J.-M. Geneste, *Art rupestre : la 3D un outil de médiation du réel invisible ?*, In Situ. Revue des patrimoines, 13–2010, 2012.

<https://journals.openedition.org/insitu/6150>

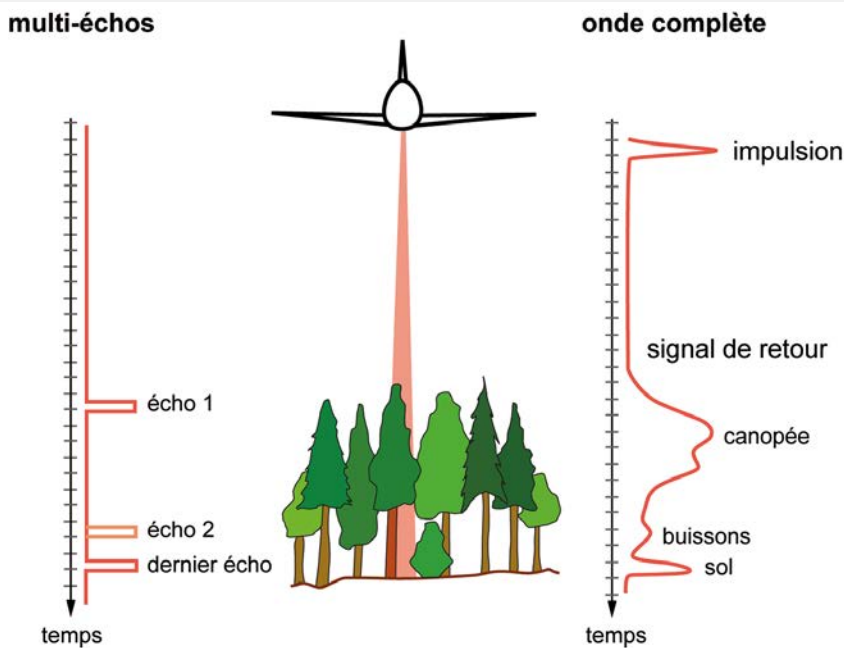
## LE LIDAR TOPOGRAPHIQUE

Un système lidar est un télémètre laser composé d'un émetteur laser et d'un récepteur de photons. Le principe de fonctionnement du lidar topographique aéroporté consiste en l'émission d'une série d'impulsions laser à très haute fréquence (jusqu'à 2 MHz), envoyées selon différentes méthodes de balayage (miroir oscillant, polygone rotatif, faisceau de fibre).

Ces impulsions sont réfléchies par le sol et la mesure du temps de retour de l'impulsion permet de mesurer la distance entre le sol et le vecteur aérien, la position et l'altitude précises de chaque point étant déduites du calcul de la position de l'émetteur-récepteur à chaque instant.

La plupart des lidars topographiques utilisent des lasers Nd-YAG à petite empreinte au sol (divergence du faisceau comprise entre 0,18 et 1 mrad pour des altitudes du vecteur de 100 à 3000 m).

Les scanneurs enregistrent soit plusieurs échos (entre 1 et 6), détectés à partir des pics d'intensité, soit l'onde complète de retour enregistrée selon deux méthodes (détection simple de photons ou détection multi-photons).



(d'après Bretar 2006)

Figure 5. Principe du système lidar.



Laser Optics  
 When Size Matters