

L'utilisation de la technologie lidar à la connaissance archéologique et géohistorique

Exemples français

JÉRÔME BURIDANT, CLAIRE PICHARD,
EMILIE GALLET-MORON

JUSQU'AU MILIEU des années 2000, les techniques de prospection mis en œuvre en milieu rural ont favorisé l'appréhension de l'espace agraire. Si la prospection pédestre est possible en milieu forestier, elle est *de facto* limitée par la présence du sous-étage, parfois dense. *A contrario*, les zones de labour favorisent, et la progression en ligne, et la découverte d'artefacts révélateurs d'anciennes occupations humaines. Dans les années 1970, l'archéologie aérienne, développée notamment en France par Raymond Chevalier, Roger Agache ou Jacques Dassié, a permis de mettre à jour de nombreuses traces archéologiques, plus particulièrement en pays de grande culture comme la Picardie¹. Mais les zones boisées restaient encore un obstacle à toute prise de vue. Cette distorsion dans l'acquisition des données a pu conduire à imaginer une stabilité historique de cette occupation du sol. Les espaces agraires actuels, riches en traces archéologiques, pouvaient apparaître avoir été mis en valeur sur une très longue durée, alors que les espaces forestiers, moins connus, pouvaient laisser l'impression d'avoir été presque toujours majoritairement boisés. Cette inégalité des connaissances renforçait l'impression donnée par les sources écrites, notamment antiques, et leur interprétation du début de l'époque contemporaine. Pline l'Ancien et Suétone, par exemple, utilisent l'expression de Gaule chevelue (*Gallia comata*) pour désigner la Gaule non romanisée, avant les conquêtes de César². L'interprétation des historiens du XIX^e siècle est que ce territoire était peu peuplé, peu exploité et couvert de forêts³.

En réalité, les découvertes archéologiques et la prospection pédestre sous-bois avaient ultérieurement montré que les espaces forestiers n'étaient pas si vides de vestiges. En 1973, le directeur des Antiquités historiques de Picardie, Jean-Pierre Desbordes, plaidait pour l'émergence d'une archéologie forestière, et même pour l'ouverture d'un « Centre de recherches archéologiques forestières » en Picardie, qui se concentrerait notamment sur le massif de Compiègne :

On saisit d'emblée l'intérêt que peut représenter la cartographie des sites archéologiques forestiers pour la restitution des zones boisées à une époque historique donnée : se révè-

lent ainsi d'anciennes clairières habitées, d'anciens lieux habités et cultivés, recouverts aujourd'hui par le bois. Pour un massif forestier comme celui de Compiègne, il est sûr que le bois ne recouvrirait pas l'emplacement des ruines, jadis habitées, non plus que le tracé des routes. L'on pourrait ainsi, peu à peu, silhouetter les contours des zones anciennement boisées. En bien des places, c'est à une véritable inversion du paysage qu'il faut conclure⁴.

Depuis le milieu des années 2000, l'utilisation de la technologie lidar (*light detecting and ranging*) en archéologie et en géographie ont permis une avancée rapide des connaissances en milieu forestier, et une accumulation considérable de données. Ce saut technologique peut être comparé à celui apporté par la prospection aérienne dans les années 1970 dans l'espace agraire. Cet article propose une rapide synthèse des secteurs prospectés depuis quelques années en France, et un focus sur les traitements et les premiers résultats obtenus dans le cadre d'un programme de recherches en forêt de Compiègne (département de l'Oise, France).

I. Le développement d'une technologie Les principes du lidar

LE LIDAR est une technique de mesure des distances utilisant les propriétés des faisceaux laser. Le principe est d'analyser le temps de retour d'un faisceau lumineux entre sa source d'émission et un objet. Cette technologie, émergente dans les années 1960-1970, présente aujourd'hui de nombreuses applications en géographie et en archéologie. On peut distinguer notamment :

- Le *lidar terrestre* : il s'agit d'un scanner laser à balayage 3D, permettant de restituer la morphologie d'un lieu à très haute précision (de quelques millimètres à quelques centimètres), sur une distance relativement courte et à une échelle limitée (modèles 3 D de monuments historiques, de bâtiments ou d'ouvrages d'art par exemple).
- Le *lidar topographique* : il s'agit d'un lidar porté par un aéronef, à basse ou moyenne altitude, permettant de restituer des reliefs sur une surface relativement importante. Cette technologie est particulièrement adaptée aux zones difficiles d'accès (forêts, zones de reliefs...).
- Le *lidar bathymétrique* : il s'agit d'un lidar aéroporté doté généralement de plusieurs faisceaux, permettant de restituer les fonds des milieux subaquatiques (lacs, rivières, mers).

En prospection forestière, le lidar topographique est la technologie la mieux adaptée. En fonction des besoins de recherche, il est important de bien calibrer la hauteur de vol, qui dépend de l'importance du relief de la zone étudiée et la vitesse de l'aéronef (drone, hélicoptère ou avion), qui conditionneront le nombre de points au sol. Des applications telles que la surveillance du trait de côte ou l'étude d'un massif montagneux nécessitent un nombre de points souvent inférieur à 5 au m². L'archéologie demande par contre une densité de points beaucoup plus importante, aujourd'hui généralement supérieure à 20 au m². Il convient aussi d'effectuer un vol en fin d'hiver, hors période de neige, afin de limiter la surface de végétation pouvant intercepter le faisceau. Après le vol, il

est nécessaire de recalibrer les données pour éliminer notamment la dérive, le tangage et le roulis de l'aéronef.

En forêt, le faisceau laser est réfléchi par la canopée, par les troncs des arbres puis par le sol. Il est donc possible de classer le nuage de points en sélectionnant les points supérieurs, les points intermédiaires et les points au sol, pour élaborer un modèle numérique d'élévation (MNE), un modèle numérique de terrain (MNT) et des modèles intermédiaires. Les modèles d'élévation et les modèles intermédiaires peuvent présenter des applications dendrométriques, pour évaluer les volumes de bois sur pied et la structure des peuplements forestiers.

Des données de plus en plus nombreuses

Les premières applications, portées par l'université de Fribourg-en-Brisgau, apparaissent en forêt de Rastatt, en pays de Bade au début des années 2000. Elles révèlent notamment des parcelles agricoles anciens, présentant des traces de billons (« champs bombés ») dans des zones aujourd'hui couvertes par la forêt⁵. Le premier relevé archéologique effectué en France a couvert la forêt de Haye, située à l'Est de la ville de Nancy, avec une densité moyenne de 11,3 points au m². Il a révélé de nombreuses structures, notamment des parcelles, des voies et des habitats d'origine probablement antique, des parcelles médiévaux, des zones d'extraction de fer ou des fours à chaux⁶.

En raison du coût élevé des vols, cette technologie est cependant encore réservée à des projets de recherche importants. En forêt domaniale, elle s'est développée en profitant de la dynamique apportée par le label Forêt d'exception®⁷. Ce label national, apporté pour le moment à des forêts domaniales et indivises, récompense des projets de territoire novateurs, autour de forêts patrimoniales. Ces projets ont souvent obtenu le financement de vols lidar, par exemple en forêt de Fontainebleau, dans les forêts de Rouen (La Londe-Rouvray et Roumare), de Verdun, de Bercé ou de la Montagne de Reims. En forêt de La Londe-Rouvray, le lidar a mis en valeur plusieurs sites protohistoriques, notamment l'oppidum d'Orival. Ce site de plusieurs dizaines d'hectares date de la fin du second âge du Fer (II^e et I^{er} siècles avant notre ère). En forêt de Bercé, dans le département de la Sarthe, le vol lidar de 2013 a révélé des enclos et un parcellaire agricole qui pourraient remonter à la Protohistoire ou l'Antiquité, des vestiges liés à la métallurgie, et des réseaux viaires anciens⁸. En forêt de Verdun, ce sont surtout les vestiges de la Grande Guerre qui ont été révélés⁹.

II. L'utilisation des images lidar en forêt de compiegne (Oise, France) L'acquisition des données

LA FORÊT domaniale de Compiègne est située en Valois, au Nord de l'Ile-de-France (Figure 1). Elle constitue un ensemble territorial cohérent et vaste (14500 ha), qui fait partie du domaine privé de l'Etat.

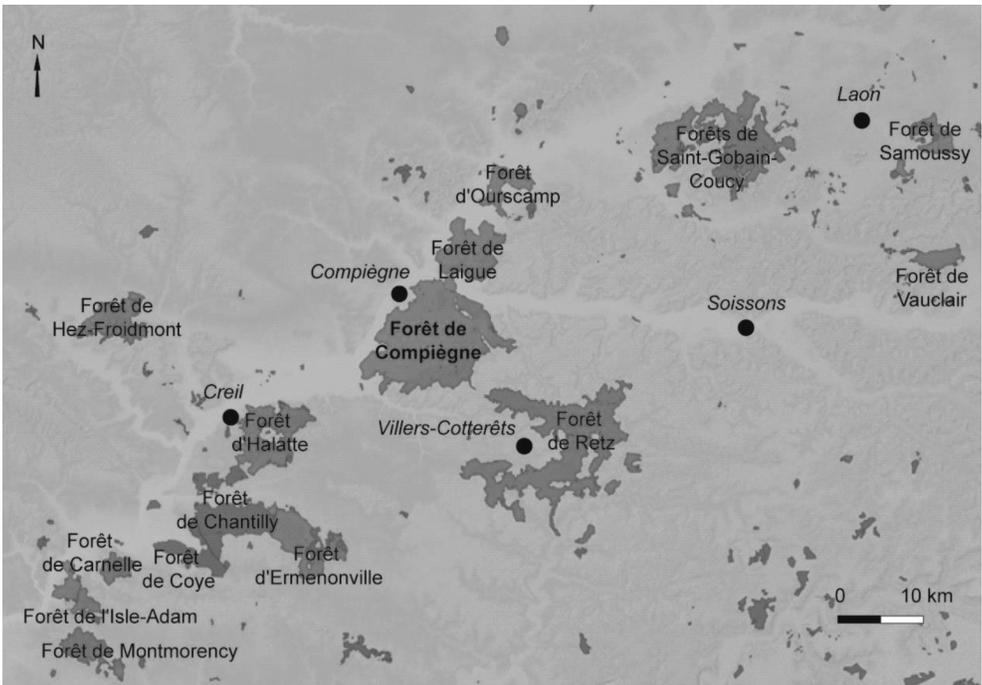


FIGURE 1 : La forêt de Compiègne, le plus grand massif forestier du Nord de l'Île-de-France (fond de carte: IGN, traitement J. Buridant)

Son altitude varie de 31 et 152 mètres au-dessus du niveau de la mer. Elle s'étend de la dépression de la vallée de l'Oise aux plateaux du Valois, en passant par la cuesta tertiaire de l'Île-de-France.

Cette forêt a fait l'objet de deux vols lidar. Le premier a été réalisé en 2011 par le Service régional d'archéologie (SRA) de la DRAC Picardie¹⁰. Il s'est limité à un secteur de 50 km² situé au centre-Est de la forêt domaniale, avec une densité moyenne d'environ 9 points par m². Il s'agissait de tester la méthode et d'en mesurer l'apport par rapport aux campagnes de prospection pédestre déjà effectuées. Le second a été réalisé en 2014 par l'Office national des forêts, sur l'ensemble des forêts domaniales de Compiègne et de Laigue, et une partie des forêts privées adjacentes, soit 330 km². La densité moyenne dépasse 23 points au m². Ces relevés ont principalement été effectués pour mettre à jour la carte archéologique régionale et pour mettre en œuvre une politique de conservation préventive des vestiges archéologiques, dans le cadre de la gestion forestière.

Dans un premier temps, les données altitudinales ont été traitées afin de produire des images, puis ces dernières ont été interprétées par le Service archéologique de l'Office national des forêts afin d'identifier des anomalies topographiques pouvant révéler des vestiges archéologiques¹¹. Pour l'interprétation des données, 3 *shapefiles* ont été créés afin de recenser les anomalies ponctuelles, linéaires et polygonales. La couche de points regroupe 1588 anomalies dont 1457 sur la forêt de Compiègne : trous de bombe, dépressions



FIGURE 2 : anomalies linéaires relevées par les images lidar acquises en 2014 (traitement S. David)

ponctuelles et autres dépressions. La couche de polylignes regroupe 4666 anomalies (960 km) dont 3797 sur Compiègne (813 km) : fossés, éléments de parcellaire ancien, talus, voies et cheminements anciens, tranchées. La couche de polygones regroupe 741 anomalies dont 456 sur Compiègne : aménagements militaires, buttes, grandes dépressions, enclos, éperons barrés, occupations, zones d'extractions et zones « perturbées ». A partir de cette interprétation, 414 secteurs présentant des anomalies de reliefs pouvant correspondre à des sites archéologiques et méritant d'être vérifiés sur le terrain ont été identifiés.

Le principal écueil des images lidar est qu'elles sont difficilement interprétables telles quelles. Toute observation doit être assortie d'un contrôle de terrain, afin de vérifier les images, confirmer ou infirmer les hypothèses formulées et, plus généralement, parfaire « l'œil » de l'analyste en confrontant sa vision des images à celle de la réalité. Cette phase demande des moyens humains non négligeables. Vu le nombre important de secteurs identifiés (414) et d'indices potentiels conservés et déjà connus (261 points enregistrés dans la carte archéologique) en forêt de Compiègne, il n'était pas possible de réaliser les prospections pédestres de vérification sur une seule campagne de terrain. Un pro-

gramme sur trois ans a donc été mis en place entre 2016 et 2018. Elles ont été réalisées l'hiver, qui est la meilleure période pour effectuer des prospections en forêt : le couvert végétal est moins important, ce qui permet de mieux voir les anomalies topographiques sur le terrain et de mettre au jour plus de mobilier (dans les chablis, les taupinières ou les zones retournées par les animaux). Après trois années de prospections pédestres en forêt de Compiègne, il est possible de présenter une nouvelle carte archéologique composée de 264 indices de sites datés de la Préhistoire à nos jours¹². Il est important de préciser que certains indices n'ont pas pu être datés. Les méthodes de prospection pédestre ne permettent pas toujours de découvrir du mobilier archéologique, surtout pour les sites les plus anciens. De même, les datations données sont assez larges (par période). Il n'est pas possible d'affiner plus ces datations, car aucun sondage n'a été réalisé.

Parmi les sites prospectés ont été retrouvés :

- 11 indices datés de la Préhistoire (dont un dolmen, six zones d'occupation et deux ateliers de taille), un seul a été retrouvé en prospection ;
- 5 indices protohistoriques dont 3 éperons barrés (2 étaient connus auparavant) et deux sites d'occupation ;
- 74 indices de sites gallo-romains dont 2 ateliers de potiers, 2 agglomérations secondaires, plusieurs voies et de nombreux sites d'occupation ;
- Pour les époques médiévales et modernes, nous avons dénombrés 7 indices pour le Moyen-âge et 5 pour l'époque Moderne. Certains sont encore utilisés comme bâtiments. C'est le cas des maisons forestières Sainte-Perrine, Saint-Nicoles-de-Courson et de la Muette, qui sont d'anciens édifices religieux ;
- 9 indices sont associés à l'époque contemporaine. La plupart sont liés à des vestiges de la première guerre mondiale ;
- 163 indices ne sont pas datés, car aucun mobilier datant n'a été mis au jour lors des prospections.

L'utilisation des images lidar dans le cadre du programme de recherches ARPEGE^{Compiègne}

En 2018 a été monté un programme commun de recherches (PCR), intitulé ARPEGE^{Compiègne} (Archéologie, paysage et environnement en forêt de Compiègne). Ce programme de quatre ans, financé par la DRAC Hauts de France et la Fondation François Sommer, associe plusieurs structures telles que l'UMR 7058 CNRS-Université de Picardie Jules Verne EDYSAN (Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés), le Service régional de l'archéologie de Picardie, l'INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives), et regroupe en tout une vingtaine de chercheurs¹³.

Ce projet vise à prolonger les recherches menées sur le massif de Compiègne en associant les connaissances archéologiques et les sciences de l'environnement. Il privilégie plusieurs axes : 1° renforcer la connaissance des parcelles anciens fossilisés sous couvert forestier, 2° renforcer la connaissance des habitats disparus, 3° développer l'archéologie des anciens parcs à gibier, 4° préciser la connaissance des paysages végétaux anciens par des analyses archéoenvironnementales.

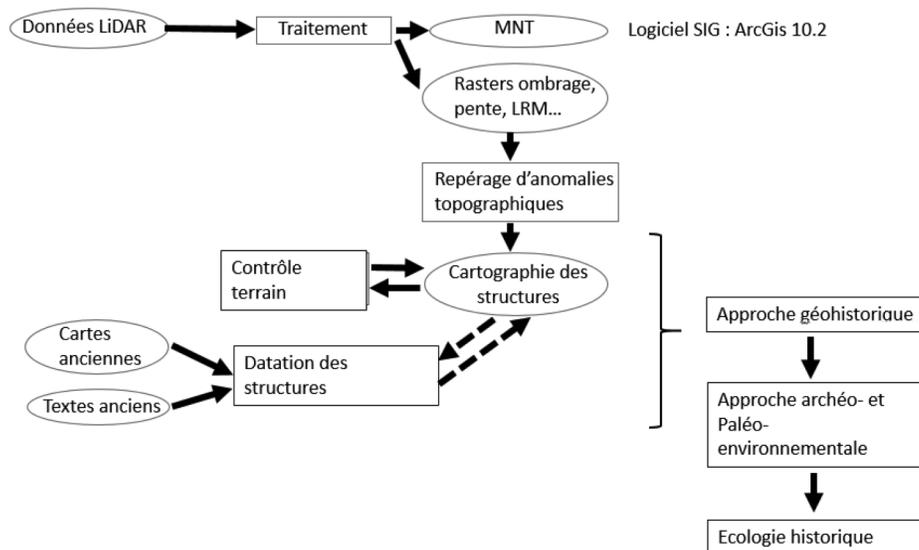


FIGURE 4 : démarche générale d'analyse

Dans ce contexte, les images lidar ont été systématiquement reprises et traitées selon des protocoles variés, en fonction des besoins d'analyse. Le prestataire a fourni les données « brutes », sous forme de fichiers .las, découpées en 1424 dalles de 500 mètres de côté. Chaque dalle est composée de plusieurs millions de points (jusqu'à 8,4 millions). Les données ont été organisées de la manière suivante : deux fichiers de nuages de points bruts (classés selon leur altitude et selon leur hauteur par rapport au sol), un modèle numérique de terrain (MNT), un modèle numérique d'élévation (MNE), et un modèle numérique de hauteur (MNH). Les données ont été généralement traitées à l'aide du logiciel Arcgis d'ESRI, qui présente des fonctionnalités très développées¹⁴.

L'objectif des différents traitements est de mettre en évidence certaines anomalies topographiques. Tous les traitements présentent des intérêts différents. A la suite des traitements lidar réalisés par Barry Devereux, Keith Challis ou encore Ralf Hesse¹⁵, les travaux de D. Goguey et J. Bénard¹⁶ menés sur les massifs forestiers du châtilonnais n'ont eu de cesse de prouver que l'analyse des images lidar par ombrages est incomplet et qu'il est important de croiser les techniques de visualisation pour augmenter les chances de détection et de lecture des anomalies. En effet, l'utilisation d'un indice unique ne permet pas d'identifier l'ensemble des structures. Sans être réducteur, il en ressort que les indices de visualisation utilisés varient en fonction des types de structures recherchées.

L'un des traitements les plus courants des images lidar est la génération d'ombrages à partir du MNT. Le principe est de faire varier la position théorique de l'éclairage, en azimut et en degré, pour faire apparaître les formes. L'éclairage doit préférentiellement se faire en lumière rasante, pour que les objets soient bien visibles. Lorsque les

objets sont particulièrement ténus (reliefs peu accentués, structures ponctuelles), il est souvent nécessaire d'effectuer une dizaine de variations pour bien visualiser une zone. Un autre traitement possible consiste à mettre en évidence l'altitude des points par rapport à leur moyenne sur une fenêtre « flottante » de quelques mètres. Une autre possibilité de traitement permet de visualiser les pentes. En discriminant les reliefs positifs et négatifs d'une structure, cette méthode favorise la mise en évidence des caractéristiques morphologiques d'une structure. Elle permet d'en lire facilement les coupes. Cette technique met bien en évidence des pentes marquées sur de faibles altitudes, par exemple des bords de fossés. À partir de la mesure d'une altitude moyenne sur l'ensemble du MNT, l'algorithme repère les surfaces en sous-élévation et en surélévation, le LRM (*local relief modelling*) met en évidence les « creux » et les « bosses » du terrain. Ces différents traitements peuvent, éventuellement, se superposer.

Il est aussi possible de mesurer la proportion de ciel visible pour chaque pixel du MNT sur une demi-sphère (Sky-View-Factor). L'algorithme calcule un angle vertical par rapport à l'horizon pour n directions. Cela met en valeur les objets les moins exposés à la lumière solaire et permet de visualiser des structures archéologiques aux reliefs très atténués, notamment les fossés et les structures en creux¹⁷. Cette approche est peu intuitive. Sur un point haut, la proportion de ciel visible est grande, alors qu'elle est réduite dans une excavation. Sur un principe similaire, les indices d'ouverture positive et négative permettent de distinguer des structures sur un secteur présentant une forte pente.

Outre cela, il appert qu'en fonction de la nature du sol, certaines techniques de visualisation répondent mieux. Il n'est pas encore possible de proposer une étude statistique de cette observation. Toutefois, il apparaît de manière empirique que sur les secteurs de sables soufflés, c'est l'utilisation du sky-view-factor et de l'ouverture topographique qui semblent faire ressortir le plus grand nombre de micro-reliefs.

Les images suivantes présentent différents traitements dans le secteur du parquet des Vineux, au Nord-Est de la forêt de Compiègne. Cette parcelle, aujourd'hui sous couvert forestier, était occupée par un parquet à faisans au XVIII^e siècle. Elle était enclose et servait exclusivement à l'élevage des faisans, avec des cultures, des bosquets et des mares. Elle a été abandonnée, puis boisée, à partir de la Révolution française. On peut voir particulièrement bien le relief dunaire du site, lié à l'abondance des sables, les anciens murs de l'enclos et des constructions adjacentes.

Un autre secteur analysé est celui de la Landeblain, au Sud du massif. Cette parcelle a, elle-aussi, été occupée par un parquet à faisans au XVIII^e siècle. Le traitement des images lidar fait surtout ressortir le système de drainage, qui alimente une série de mares, pour l'abreuvement des animaux.

Un dernier exemple concerne l'étude d'anciennes garennes royales. Il est aujourd'hui admis que le lapin de garenne, connu dans l'Antiquité dans la Péninsule ibérique, était presque inconnu en Gaule. Son expansion dans l'ensemble du continent européen date du milieu de l'époque médiévale. Aux XII^e-XIII^e siècles, celui-ci est massivement introduit dans les îles britanniques, les premières garennes royales apparaissant dès 1235¹⁸. Sur le continent, les premières garennes à lapins semblent, elles aussi, dater des XIII^e-XIV^e siècles. Cette expansion paraît donc largement animée et contrôlée par l'homme, pour des raisons économiques et cynégétiques. Durant cette période, le lapin fournit d'abord un revenu

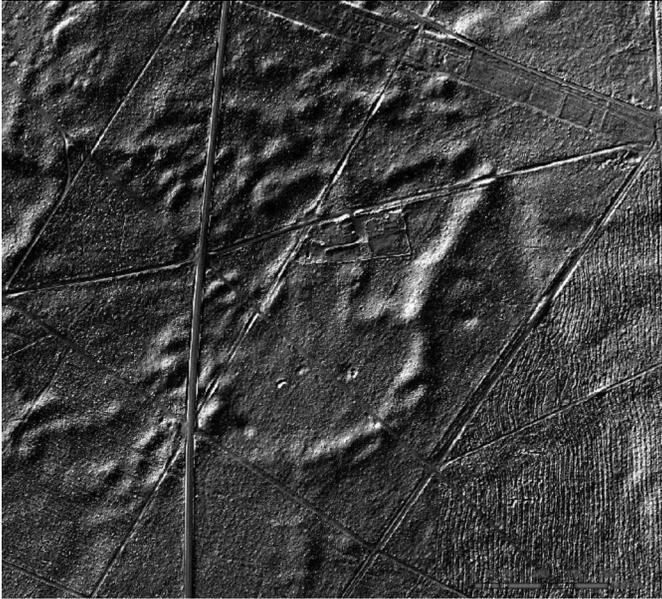


FIGURE 5 : parquet des Vineux, traitement par ombrages, altitude 3 m, azimuth 315°
(image lidar ONF, réalisation Emilie Gallet-Moron)

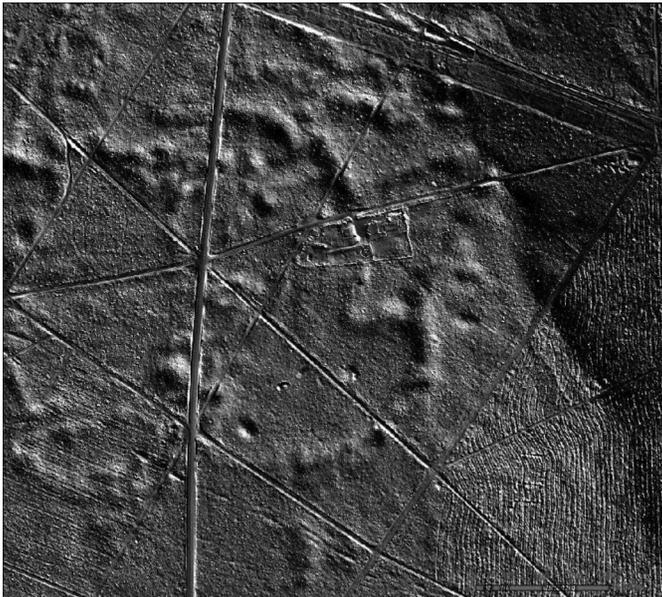


FIGURE 6 : parquet des Vineux, traitement par ombrages, altitude 3 m, azimuth 45°
(image lidar ONF, réalisation Emilie Gallet-Moron)

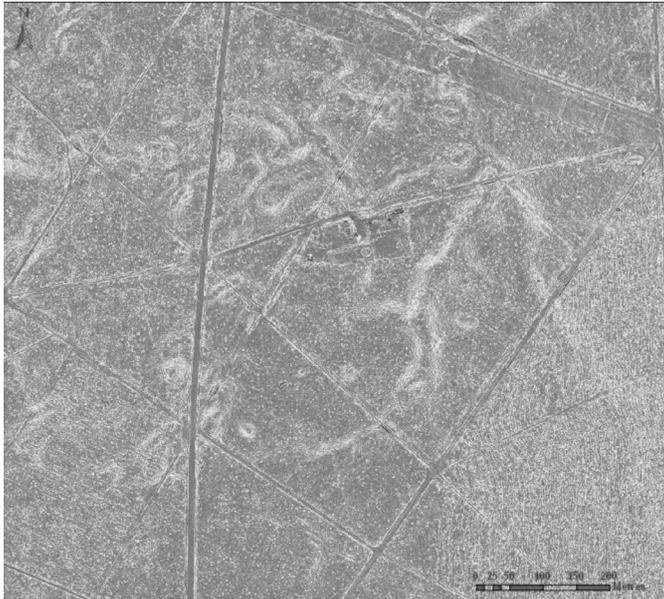


FIGURE 7 : parquet des Vineux, visualisation des ruptures de pentes
(image lidar ONF, réalisation Emilie Gallet-Moron)



FIGURE 8 : parquet des Vineux, traitement par LRM
(image lidar ONF, réalisation Emilie Gallet-Moron)

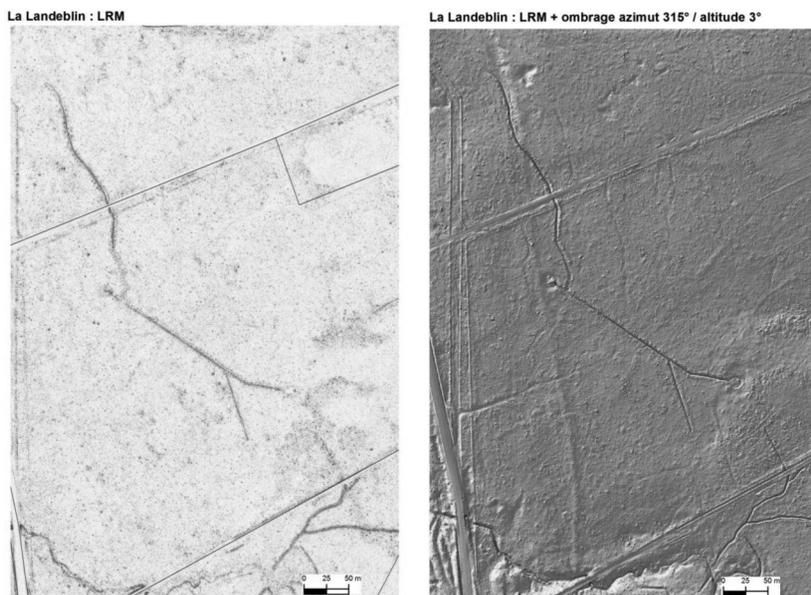


FIGURE 9 : parquet de la Landebtain, traitements par LRM et par ombrages (image lidar ONF, réalisation Emilie Gallet-Moron)

intéressant, par la production de viande et de peaux. Mais son élevage peut être aussi destiné aux plaisirs de la chasse. En forêt de Compiègne, les textes mentionnent l'établissement de plusieurs garennes royales, dans sept lieux-dits différents. Il pourrait ponctuellement s'agir de parcs à gros gibier, mais plusieurs d'entre elles concernent l'élevage spécifique des lapins. Les images lidar, traitées par ombrages, ont mis en avant l'existence de 54 buttes de terre, situées dans les secteurs où les textes anciens indiquaient des garennes. Ces buttes se situent toutes à la périphérie du Massif, à l'Ouest, au Nord-Est et surtout au Sud. Les contrôles de terrain ont éliminé des amas de gravats, d'anciennes meules de charbonniers et des ronciers, pour ne retenir que 22 structures. Ces structures, incluses dans des parcellaires anciens, pourraient être interprétées comme des mottes à connils, c'est-à-dire comme des buttes établies à l'époque médiévale pour l'élevage des lapins.

Cette phase de traitement et d'analyse d'images lidar, associée à un contrôle terrain systématique, permet aujourd'hui de s'engager vers une phase de fouilles et de post-fouille solide.

L'ensemble de ces images, en forêt de Compiègne, a donc permis de révéler une occupation du sol sur la quasi-totalité de l'espace actuellement sous couvert forestier, durant l'Antiquité. Le boisement des époques médiévale et moderne est confirmé par des traces d'occupation, plus ponctuelles. Mais les connaissances apportées par le lidar sur les anciens parcs à gibier prouvent dès à présent que les paysages étaient loin d'être aussi fermés que de nos jours, et qu'il devait exister une très grande diversité des couverts et de la gestion de l'espace.

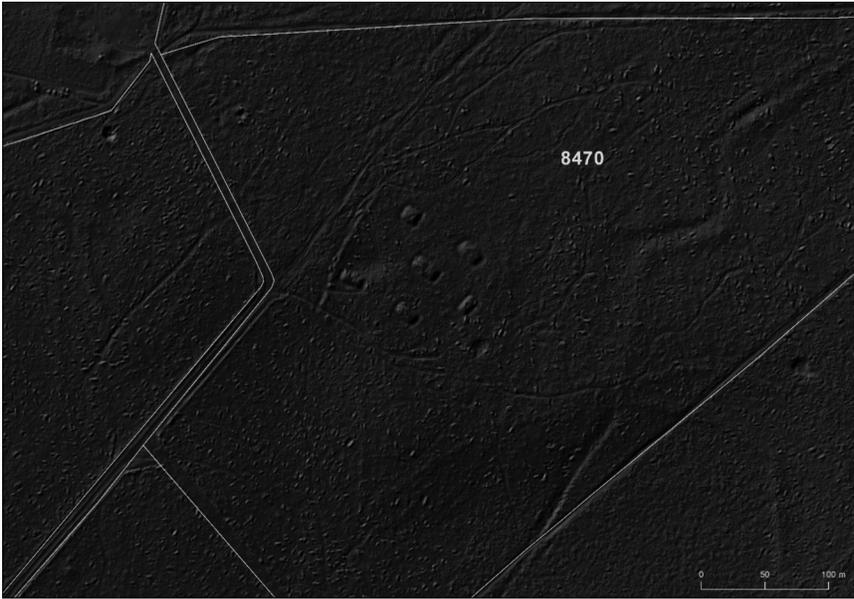


FIGURE 10 : un ensemble de six buttes rectangulaires, associé à des micro-reliefs linéaires marqués, parcelle 8470, aux Grueries (image lidar ONF, traitement Emilie Gallet-Moron)

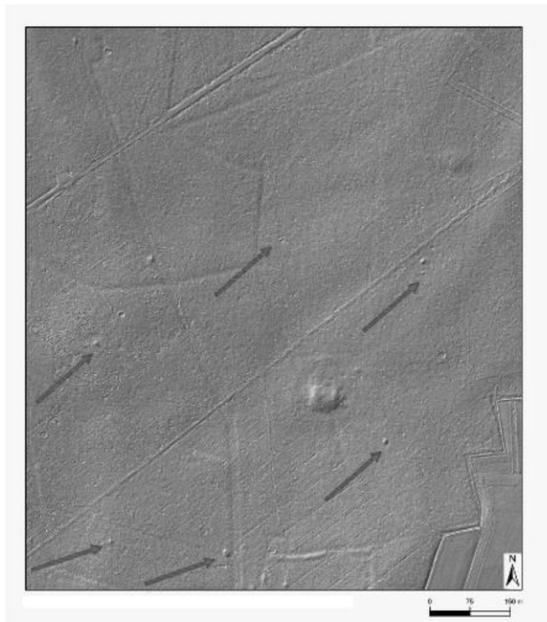


FIGURE 11 : aux garennes de la Fortelle, l'image lidar révèle un ensemble de petites buttes (flèches rouges) et plusieurs parcellaires anciens (images lidar ONF, traitement Emilie Gallet-Moron)

Conclusion

NOUS BÉNÉFICIONS donc aujourd'hui d'une quinzaine d'années d'expériences dans l'utilisation du lidar en archéologie comme en géographie. Cette expérience permet aujourd'hui de bien spécifier les cahiers des charges, mais aussi de mettre en avant des méthodes de traitement et d'analyse efficaces, avec des comparaisons possibles de structures entre différents sites. La difficulté aujourd'hui reste moins d'acquiescer des images que d'avoir le personnel et le temps nécessaires pour les traiter et les analyser, tant la quantité de données fournies est considérable.

Si l'imagerie lidar permet de réaliser un bond quantitatif considérable dans l'acquisition des données, il faut être conscient de ses limites. L'image lidar permet essentiellement de révéler des micro-reliefs, peu visibles à l'œil, en raison du couvert végétal ou de leur taille. Elle présente d'abord des défauts de résolution dans des peuplements denses, notamment des forêts de conifères. Elle offre une résolution plus faible lorsque les vols doivent être effectués à plus haute altitude, notamment en forêt de montagne. Elle ne révèle pas de structure enterrée. Elle met bien en évidence les habitats en dur, mais révèle mal des constructions réalisées avec des moyens moins impactants pour le milieu, notamment les bâtiments en bois. Elle ne permet pas non plus de mettre en avant des structures enfouies qui ne forment pas de micro-reliefs, comme de structures en creux comblées. Pour cette raison, l'imagerie lidar met davantage en évidence les structures des époques antique et contemporaine, au détriment de celles de la proto-histoire comme du Moyen Âge. □

Notes

1. Jacques Dassié, *Manuel d'archéologie aérienne*, Paris, Technip, 1978 ; Roger Agache, REF ; Alain Ferdière, *La prospection*, Paris, Errance, 1998. Voir archéologie forestière colloque
2. Pline l'Ancien, par exemple, affirme que toute la Gaule est « désignée sous le nom général de chevelue » (*Histoire naturelle*, livre IV, XXXI, 1), Suétone distingue la Gaule cisalpine de la Gaule chevelue (*Vie de Jules César*, XXII, 2). Catulle parle par contre de Gaule transalpine (*Poésies*, XXIX). Voir aussi Monique Clavel-Lévêque, « La forêt gauloise vue des textes (Actes du colloque sur la forêt, Paris, 1967) », *Puzzle gaulois. Les Gaules en mémoire : collection de l'Institut des sciences et techniques de l'Antiquité*, n° 396, 1989, p. 157-172.
3. Notamment Alfred Maury, *Recherches historiques et géographiques sur les grandes forêts de la Gaule et de l'ancienne France*, Paris, Duverger, 1848 ; id., *Les forêts de la France dans l'Antiquité et au Moyen Âge*, Paris, Imprimerie impériale, 1856.
4. Jean-Michel Desbordes, « La recherche archéologique sous-bois », *Revue archéologique de l'Oise*, n° 3, 1973, p. 12.
5. B. Sittler, K. Hauger, « Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcelles anciennes fossilisées par la forêt : l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade », in J.-L. Dupouey, E. Dambrine, C. Dardignac, M. Georges-Leroy (dir.), *La mémoire des forêts. Actes du colloque « Forêt, archéologie et environnement » 14-16 décembre 2004*, ONF – INRA – DRAC Lorraine, 2007, p. 155-161.
6. Murielle Georges-Leroy, Jérôme Bock, Etienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey, « Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye », *ArchéoSciences – Revue d'archéométrie*, n° 35, 2011, p. 117-129.
7. <http://www1.onf.fr/foret-exception>

8. Guylaine Archevêque, Régis Valienne (dir.), *Bercé, un trésor partagé, dossier de candidature au label forêt d'exception*, Office national des forêts, mars 2017.
9. Rémi de Matos-Machado, *Paysages de guerre et lidar : de la caractérisation des polémoformes à la conservation des patrimoines naturel et culturel de la forêt domaniale de Verdun (Meuse, France)*, Université de Paris-Sorbonne : thèse de doctorat (Géographie), 2018. En Champagne, le programme de recherches Impact 14-18 a aussi utilisé des relevés lidar pour étudier des formes héritées du premier conflit mondial. Ils ont été utilisés dans sa thèse par Pierre Taborelli, *Les conditions géographiques et l'organisation spatiale du front de la Grande Guerre : application à l'évaluation environnementale post-conflit en Champagne-Ardenne (France)*, Université de Reims Champagne-Ardenne : thèse de doctorat (Géographie), 2018.
10. Direction régionale de l'action culturelle (Ministère de la Culture).
11. Sophie David, *Rapport d'analyse et d'interprétation de données lidar; forêts domaniales de Compiègne et de Laigue (Oise), rapport d'étude archéologique*, Office national des forêts, 2014.
12. Sophie David, Cécile Dardignac, Caroline Bustos, *Rapport de prospections archéologiques d'après données lidar: Forêt domaniale de Compiègne (Oise)*, Office national des forêts, 2016 ; Sophie David, Cécile Dardignac, *Rapport de prospections archéologiques d'après les données lidar: Forêt domaniale de Compiègne (Oise)*, Office national des forêts, 2017 ; id., *Rapport de synthèse des prospections archéologiques d'après les données lidar: Forêt domaniale de Compiègne (Oise)*, Office national des forêts, 2018.
13. J. Buridant, B. Brasseur, L. Chalumeau, C. Dardignac, S. David, E. Gallet-Moron, L. Hugonnier, M. Larratte, C. Pichard, *Projet collectif de recherches. Archéologie, paysage et environnement en forêt de Compiègne (ARPEGE^{Compiègne}) : rapport d'activités, année probatoire 2018*, Amiens, Université de Picardie Jules Verne, 2019 ; L. Bensaddek, V. Burban-Col, J. Buridant, B. Brasseur, L. Chalumeau, E. Gallet-Moron, H. Horen, C. Pichard, S. Rassat, *Projet collectif de recherches. Archéologie, paysage et environnement en forêt de Compiègne (ARPEGE^{Compiègne}) : rapport d'étape 2019*, Amiens, Université de Picardie Jules Verne, 2020.
14. Certains traitements, notamment les ombrages, peuvent être aussi réalisés sous AutoCAD ou sous QGis, associé au logiciel GRASS.
15. Challis Keith, Paolo Forcin, Mark Kinsey, « A Generic Toolkit for the Visualization of Archaeological Features on Airborn Lidar Elevation Data », *Archeological Propection*, n° 18, 2011, p. 279-289 ; Devereux Barry, Amable Gabriel, Crow Peter, Cliff Andrew, « The Potential of Airbon Lidar for Detection of Archaeological Features under Woodland Canopies », *Antiquity*, n° 79, 2005, p. 648-660 ; Hesse Ralf, « Lidar-derived Local Relief Models : A New Tool for Archaeological Propection », *Archeological propection*, n° 17, 2010, p. 62-72 ; Ž. Kokalj, K. Zakšek, K. Oštir, « Application of Sky-view Factor for the Visualisation of Historic Landscape Features in Lidar-derived Relief Models », *Antiquity*, n° 85, 2011, p. 263-273.
16. Dominique Goguy, Jacky Bénard, « Structures en pierre du plateau du châtilonnais (Côte d'Or) : du Hallstatt à l'Antiquité tardive », *Archéologie et Histoire romaine*, n° 39, Bruges, 2018.
17. Goguy, Bénard, *op. cit.*
18. Xavier de Planhol, *Le paysage animal. L'homme et la grande faune : une zoogéographie historique*, Paris, Fayard, 2004.

Abstract

Use of Lidar Technology for Archaeological and Geo-historical Knowledge. French Examples

The airborne laser or *lidar* (*Light Detection and Ranging*) is a technology in full development. For about fifteen years it has presented applications in geography and archeology. In particular, it makes it possible to obtain a high-resolution digital terrain model under the forest canopy. In France, lidar has been used in many forests such as those of Haye, Rouen, Fontainebleau or Verdun. This article presents the applications of the lidar tool to the Compiègne national forest, north of Paris (department of Oise). It offers some image processing, applied to the study of plots and old game parks.

Keywords

lidar, remote sensing, archaeology, historical geography

