HAL
open science

LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ?

Laure Nuninger, Catherine Fruchart, Rachel Opitz

▶ **To cite this version:**

Laure Nuninger, Catherine Fruchart, Rachel Opitz. LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ?. Bulletin AGER, 2010, 20, pp.34-43. halshs-00617050

HAL Id: halshs-00617050

https://shs.hal.science/halshs-00617050v1

Submitted on 25 Aug 2011

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

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

LiDAR : quel apport pour l'analyse des paysages ?

Laure NUNINGER[1], Catherine FRUCHART[2], Rachel OPITZ[2]
avec la collaboration de l'équipe Lieppec[3] et de l'association ARESAC[4]

En plein essor depuis quelques années en France, la technologie LiDAR (*Light Detection and Ranging*) apparaît comme un outil révolutionnaire notamment pour les archéologues qui s'intéressent aux vestiges sous forêts. En effet, elle permet de faire un relevé micro-topographique extensif en un temps record et ce malgré la couverture végétale. Déjà appliquée, entre autres, dans le Pays de Bade (Sittler & Hauger, 2007), en Alsace, sur la forêt de Haye en Lorraine (Georges-Leroy *et al.*, 2008), sur le site de Bibracte en Bourgogne (Bibracte, coll. 2010), sur le littoral languedocien (Nuninger [dir.], 2008), elle l'a été plus récemment (2009) en Franche-Comté dans le cadre du projet LIEPPEC (*Lidar pour l'Étude des Paysages Passés et Contemporains*) soutenu par la Maison des Sciences de l'Homme et de l'Environnement (MSHE) C. N. Ledoux à Besançon. Il s'agit d'une opération d'acquisition qui couvre deux zones autour des agglomérations antiques de *Vesontio* (Besançon) et *Epomanduodurum* (Mandeure-Mathay) de respectivement 140 et 80 km^2.

Les résultats obtenus sur ces nouvelles zones d'étude, en particulier dans la forêt de Chailluz (Besançon), confirment l'intérêt de cette nouvelle source d'information pour alimenter la carte archéologique.

Néanmoins, sur le plan méthodologique, l'expérience développée à Besançon en collaboration avec une équipe de géodésistes slovènes montre que le LiDAR ne se résume pas à une seule « image » supplémentaire dans la succession des couches d'un SIG. En tant que donnée à part entière, elle peut être traitée à différents niveaux et selon différents protocoles qui vont renouveler la perception des objets que l'on peut identifier. Sur le plan thématique, la compréhension de cette donnée ouvre de nouvelles perspectives et renouvelle notre questionnement sur les paysages, du fait du passage de la planimétrie à l'altimétrie mais aussi grâce au type de structures identifiées que l'on peut questionner dans une approche globale. On présentera quelques exemples pour illustrer ces propos.

Les principes de la technologie LiDAR : rappels

La technologie LiDAR consiste à collecter des mesures de distance à un objet à l'aide d'un télémètre laser dont le faisceau lumineux est balayé à la surface de la terre par un miroir oscillant (fig. 1). La distance aux objets touchés par le faisceau laser du télémètre est calculée à partir de la différence de temps entre le moment où l'impulsion laser est émise et le moment où le retour de ce même signal réfléchi par l'objet touché est enregistré par le capteur. La répétition des mesures à une fréquence très élevée permet d'obtenir une description précise des objets sous la forme d'un nuage de points renseignés par des coordonnées x, y et z, dans la mesure où on connaît par ailleurs la position exacte de la source émettrice : les systèmes *LiDAR* sont en effet associés au système de géolocalisation par satellite *Global Positioning System* (GPS) et à une unité de mesure inertielle (IMU). Cette unité de mesure inertielle enregistre l'accélération et tous les mouvements du système aéroporté permettant de définir un positionnement relatif très précis, pour corriger les relevés de position absolue (GPS). La très haute fréquence des impulsions du système laser assure l'acquisition d'une forte densité de données au m^2 (jusqu'à plus de 10 points de réflexion – 8 points dans la zone d'étude qui concerne le projet Lieppec), dont l'IMU et le GPS combinés garantissent une précision planimétrique et altimétrique sans équivalent avec une erreur absolue de l'ordre de 10 cm, voire moins.

1. Laboratoire Chrono-Environnement UMR 6249 / LEA ModeLTER.
2. MSHE C. N. Ledoux USR 3124 / LEA ModeLTER.
3. Clément Laplaige, Gilles Bossuet, Pierre Nouvel, Philippe Barral, François-Pierre Tourneux, Mathieu Thivet, Erika Upégui.
4. Daniel Daval, Patrick Mosca, Marc Petit.

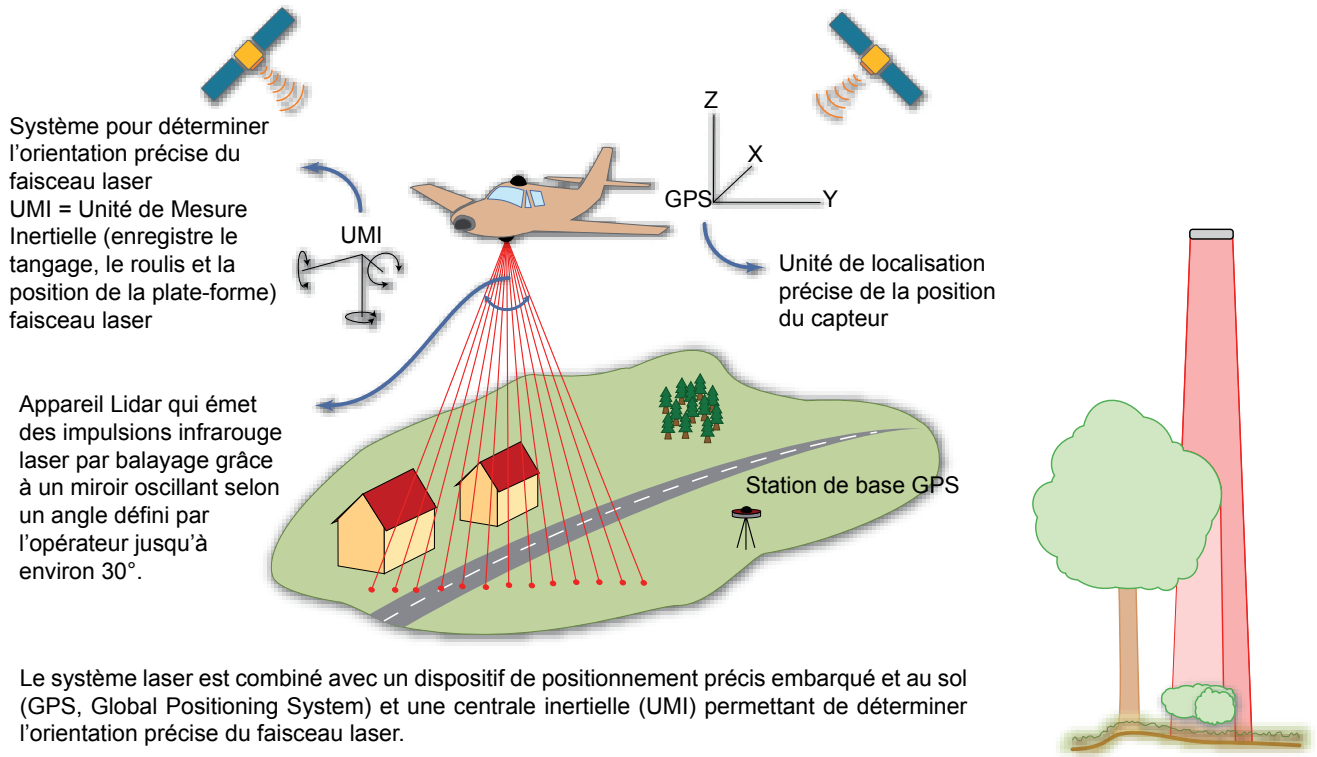

Fig. 1. Principe du système laser aéroporté (LiDAR - Light Détection and Ranging), d'après Z. Kokalj et K. Ostir (LEA ModeLTER, ZRC SAZU)

Par rapport aux autres techniques de télédétection, le laser aéroporté a l'avantage d'être capable de pénétrer la couverture végétale pour enregistrer des points au sol (fig. 2). En effet, si une partie du faisceau est arrêté par la végétation (troncs, branches, etc.), ce dernier peut continuer sa course avec une intensité plus faible en passant à travers celle-ci.

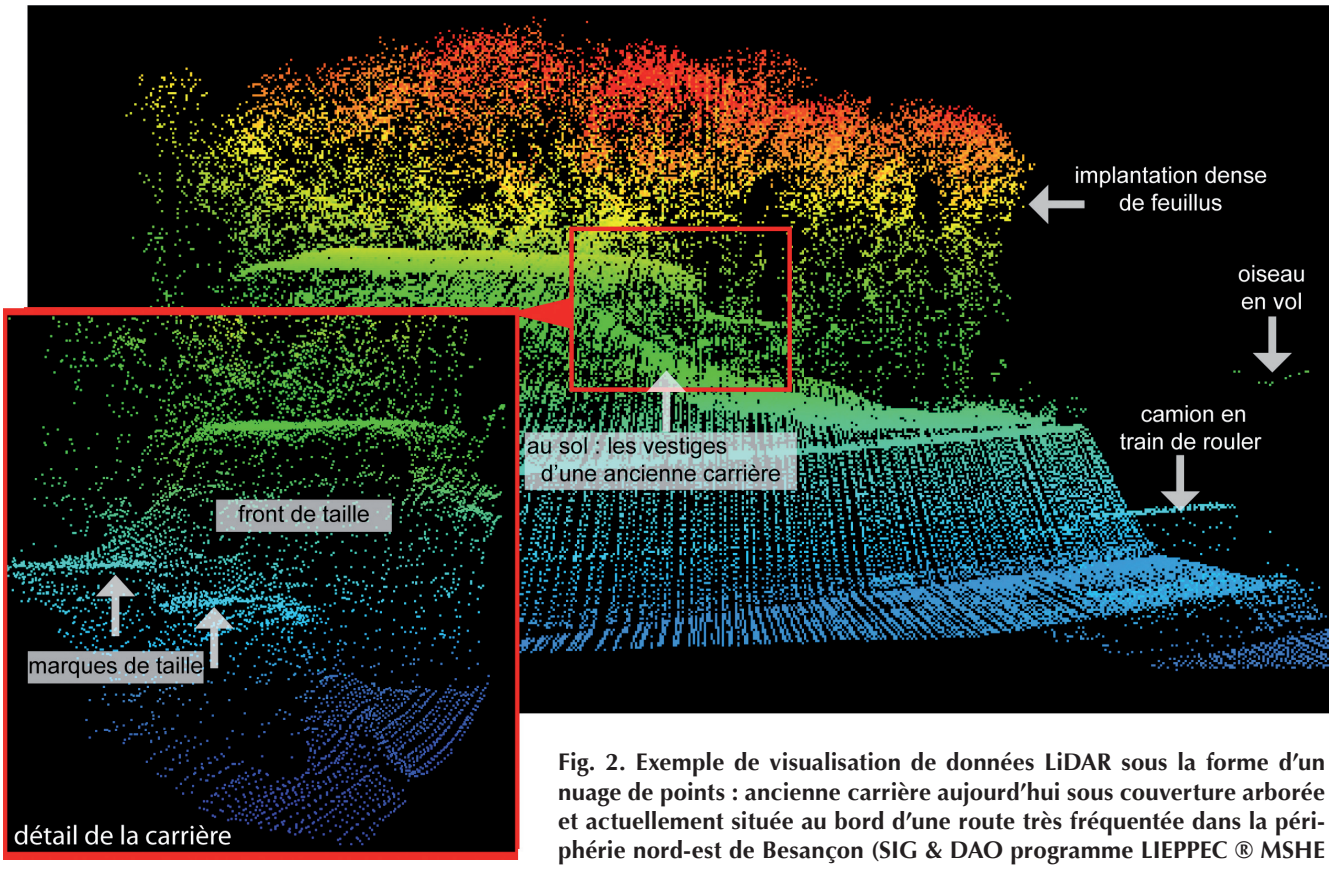

Fig. 2. Exemple de visualisation de données LiDAR sous la forme d'un nuage de points : ancienne carrière aujourd'hui sous couverture arborée et actuellement située au bord d'une route très fréquentée dans la périphérie nord-est de Besançon (SIG & DAO programme LIEPPEC ® MSHE C.N. Ledoux, C. Fruchart)

De l'acquisition à la détection par photo-interprétation

Contrairement à la représentation que s'en font la majorité des archéologues non avertis, le résultat de l'acquisition ne correspond pas à un cliché comme pour une photographie aérienne classique mais 1) à un nuage de points qui va ensuite être analysé et traité pour 2) modéliser une surface. Ce même modèle de surface va être analysé et traité à son tour pour produire 3) la représentation ou « l'image » que l'archéologue va analyser et interpréter pour 4) en extraire des objets (structures) et les cartographier.

À elle seule, la description de ce processus montre que si l'acquisition est rapide, l'exploitation des données LiDAR est une mine qui a de quoi occuper des chercheurs aux compétences variées et complémentaires pendant un temps beaucoup plus long. Cet investissement est malheureusement sous-estimé dans la plupart des projets qui font appel à cette technologie.

Comprendre le nuage de points et sélectionner une information pertinente

Le nuage de points obtenus lors de l'acquisition concerne tous les éléments présents à la surface terrestre sans distinction. Ainsi, un point pourra correspondre au sommet d'un muret, au terrain nu (sol), à une feuille ou à une branche ou encore à un fil électrique ou à un oiseau présent dans les airs juste au moment de l'acquisition. Les points sont donc classés et attribués aux objets qu'ils participent à décrire : le bâti, la végétation haute, la végétation basse, les hors-sujets (oiseaux) ou les valeurs aberrantes (dites « *outlier* » dues aux effets multitrajets, c'est-à-dire les trajectoires multiples prises par le rayon réfléchi). Il existe plusieurs méthodes de filtrage (ou algorithmes) pour faire cette classification. Le principe de ces méthodes repose généralement sur une analyse de distance entre les points : sur la distance planimétrique qui les sépare mais aussi sur la distance thématique, c'est-à-dire sur la différence de valeur altimétrique. Pour extraire les points sols, l'analyse pourra viser à regrouper les points les plus proches au niveau planimétrique avec la meilleure cohérence possible dans la progression des valeurs altimétriques. Une rupture brusque dans les valeurs altimétriques (un tronc ou un mur) permet d'attribuer les points à deux classes différentes par exemple.

En fonction des méthodes utilisées et des paramètres retenus pour le filtrage des points, on obtient des résultats différents qui vont plus ou moins bien extraire les objets que l'on souhaite observer. Considérons, par exemple, un filtrage très général dissociant très bien la végétation haute mais pas la végétation basse dont les points vont être regroupés avec les points sols. Dans ce cas de figure, les haies basses et les buissons rasants vont être intégrés dans la modélisation de la surface représentant le sol (MNT – Modèle Numérique de Terrain). En soi, cela n'est pas un problème si le chercheur qui interprète les données en aval en est conscient afin de pouvoir, par la suite, filtrer ces anomalies en croisant le MNT LiDAR avec d'autres sources d'information (orthophotographie, plans, terrain, etc.). Inversement, on peut considérer un filtrage plus radical qui va dissocier les points sols des points de végétation basse pour éliminer ce qui est au voisinage du sol sans pour autant en faire partie. Le résultat obtenu est un MNT beaucoup plus lisse et plus esthétique, bénéfique pour mettre en évidence les micro-reliefs mous, tels que des buttes de terre érodée. Cette opération a malheureusement le désavantage de supprimer les points correspondant aux petites micro-structures à angle vif, telles que des fronts de taille par exemple. Dans ce cas, de nombreuses informations de nature archéologique peuvent disparaître sans que l'archéologue en ait forcément pris conscience. Par ailleurs, certains pourraient être tentés, parce qu'ils utilisent un modèle trop lissé, de conclure qu'un MNT LiDAR n'est pas utile, voire est mauvais pour la détection parce qu'ils n'y ont pas reconnu des anomalies qu'ils ont pourtant observées sur le terrain. Les exemples développés ci-dessus montrent bien que ceci ne peut être affirmé sans avoir d'abord examiné le nuage de points qui a servi à générer le MNT. C'est pourquoi on ne saurait trop insister, quel que soit le niveau technique de l'équipe et le projet archéologique, sur le fait de demander systématiquement au fournisseur les données brutes ainsi que le nuage de points filtré qui a servi à produire le MNT.

Les deux exemples extrêmes, mentionnés ci-dessus, montrent qu'il est important de travailler dès l'amont sur ces méthodes de filtrage ou, en tout cas, d'être en mesure de comprendre la méthode utilisée par le professionnel qui l'a réalisé afin de comprendre le résultat que l'on expertise et que l'on interprète. Il existe un vaste domaine à explorer qui consiste à tester et à élaborer de nouvelles méthodes de classification (filtrage) pour extraire les objets archéologiques que l'on souhaite détecter même si cela produit des MNT moins esthétiques (fig. 3). Ce champ fait déjà l'objet de travaux particuliers traitant non seulement des questions de filtrage mais également des différentes techniques d'acquisition (Kobler *et al.*, 2007 ; Doneus *et al.*, 2008).

Visualiser les modèles numériques de terrain : une approche cubiste

Après avoir été filtré ou classé, le nuage de points sert ensuite de base pour modéliser une surface. Soit on estime des valeurs altimétriques à chaque unité de surface à partir de la triangulation des points, soit on génère une grille de points régulière en attribuant à chaque nœud de la grille sa valeur moyenne en considérant son voisinage. Cette méthode a pour objectif de lisser les valeurs et de proposer une estimation des pentes entre les points de la grille. Visuellement, il est difficile d'analyser un MNT directement car les palettes de couleurs ou de nuances

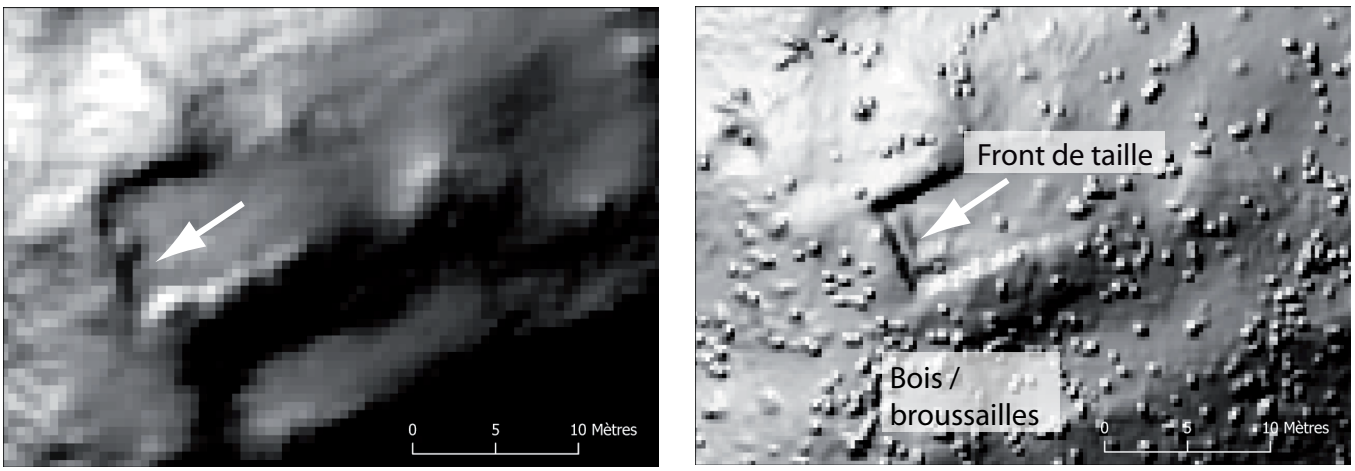

Fig. 3. Détection d'une petite carrière (zone de Besançon) (SIG & DAO programme LIEPPEC ® MSHE C. N. Ledoux / LEA ModeLTER, R. Opitz et A. Marsetic)

de gris qu'on est en mesure de percevoir (et de générer dans les logiciels de SIG) sont trop restreintes pour rendre compte de toutes les subtilités dans les variations du relief. Toute une phase du travail consiste donc à traiter ce MNT en accentuant localement les contrastes afin de faire ressortir visuellement l'information encapsulée dans le modèle. Une des techniques les plus simples est de réaliser une illumination artificielle du MNT, c'est-à-dire de projeter une source lumineuse artificielle en lui donnant une direction (azimut) et une élévation, permettant de créer des ombrages et ainsi de visualiser le relief. C'est généralement en usant de cette technique que l'on présente le résultat des données LiDAR (Bewley *et al.,* 2005 ; Georges-Leroy *et al.*, 2008).

Selon ce que l'on cherche à mettre en évidence, il est toutefois possible de mettre en œuvre différents modes de traitement qui vont chacun rendre compte d'un aspect de l'objet (butte, fossé, dépression, etc.) que l'on cherche à identifier. C'est pourquoi on peut parler d'une approche cubiste, en gardant à l'esprit que chaque mode de visualisation rend compte d'une manière particulière d'observer l'objet, qui peut être cohérente avec les autres modes de visualisation ou discordante, sans que cela remette en cause l'existence de l'objet en question. Il existe de nombreuses recherches sur ces modes de visualisation ainsi que des modèles de traitement déjà développés et implantés dans des logiciels d'environnement SIG ou de traitement d'image. Parmi ces modèles de traitement, le modèle MDOW (Multi-directional Oblique Weighting Model) développé par l'USGS (Mark, 1992) permet d'intégrer en les pondérant le résultat de plusieurs ombrages, selon des directions différentes (225°, 270°, 315°, 360°), dans une seule image (fig. 4). Ce type de traitement, disponible dans l'environnement ArcGIS, permet

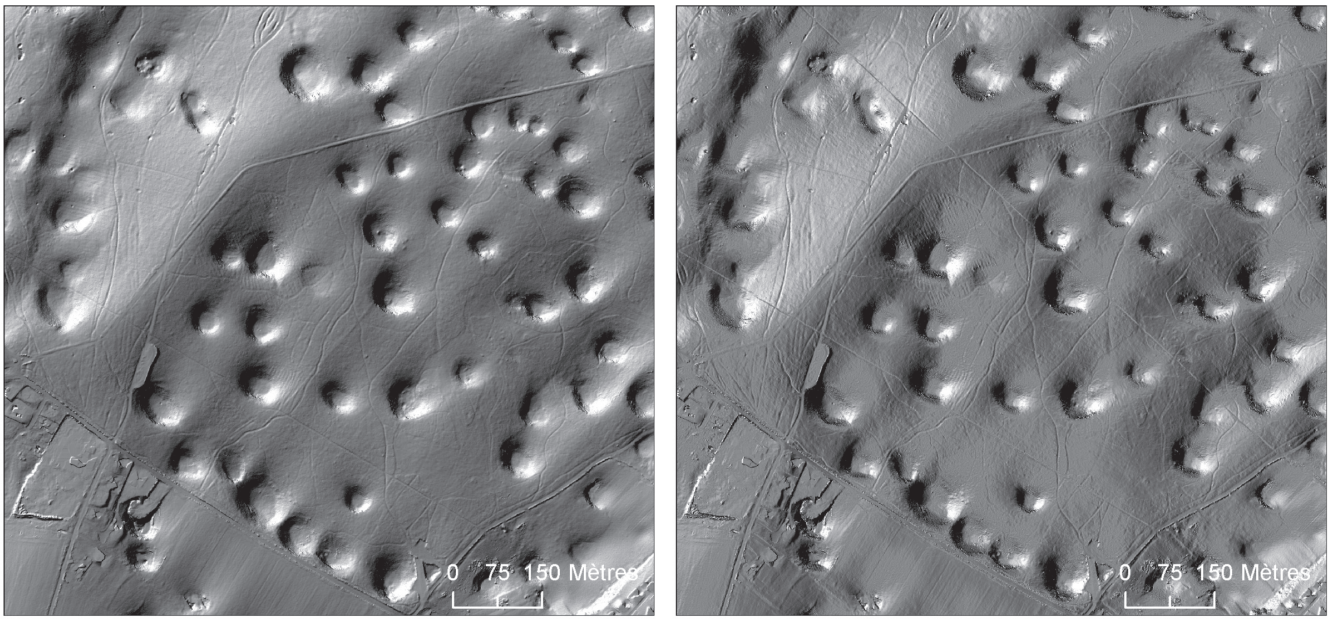

Fig. 4. Classique illumination et mdow (zone de Besançon) (SIG & DAO programme LIEPPEC ® MSHE C. N. Ledoux, L. Nuninger)

notamment de faire ressortir des éléments structurants du paysage qui n'apparaissent pas dans leur ensemble avec les méthodes d'illumination traditionnelle utilisant un seul azimut pour la source lumineuse. Dans le cas de la source unique d'éclairage, certaines structures restent toujours illisibles, soit parce qu'elles ont la même orientation que la source lumineuse et sont donc dépourvues d'ombre, soit parce qu'elles sont hors de portée de la source d'éclairage et par conséquent intégralement dans l'ombre. Mais le modèle MDOW est juste un exemple de traitement de MNT permettant d'apporter une information originale. Pour qui cherche à mettre en évidence les anomalies du terrain visibles sur un MNT donné, la meilleure solution consiste à adapter son outil aux spécificités de sa zone d'étude : azimut et élévation de la source lumineuse choisis en fonction notamment des particularités du relief, combinaison de modèles générés avec des éclairages différents et visionnés simultanément en les superposant par transparences, etc.

Les modèles fondés sur le calcul de l'indice Sky View Factor sont plus avancés. De manière générale, le principe vise à illuminer chaque point de l'espace en fonction de la portion de ciel visible depuis ce point (Kokalj *et al.*, 2010). En d'autres termes, une zone encaissée sera très peu illuminée, tandis qu'une crête le sera fortement car la portion de ciel visible est supérieure à une demi-sphère. Combinée à une illumination multidirectionnelle, cette approche permet également de faire ressortir les éléments structurants dans leur intégralité mais en accentuant leur contraste local pour mieux les visualiser.

De manière plus classique mais non moins efficiente, tous les traitements généralement appliqués aux MNT « habituels » d'une résolution de 25 à 90 m en planimétrie et d'ordre métrique en altimétrie peuvent être utilisés avec des MNT LiDAR dont la résolution planimétrique est de 25 à 50 cm et altimétrique de 15 à 25 cm, pour en extraire des données d'ordre micro-topographique. Typiquement, on peut produire à partir des MNT LiDAR des courbes de niveaux et des cartes des pentes à même de mettre en évidence des micro-reliefs. Par exemple, un traitement de type « pentes » met bien en évidence les emplacements de plates-formes de charbonniers, espace circulaires de quelques mètres de diamètre qui ont la particularité d'être toujours bien horizontaux (fig. 5). Ces plates-formes apparaissent sur le modèle sous la forme de petits ronds très caractéristiques, à peu près tous de la même taille et tous de la même couleur, celle qui correspond a une absence totale de pente (0 %).

Il existe ainsi une multitude de traitements déjà utilisables ou en cours de développement. Ces traitements peuvent également être combinés pour renforcer certains contrastes tout en supprimant ceux qui créent du bruit, c'est-à-dire qui brouillent l'image (Hesse, 2010).

Par rapport à la photographie aérienne ou plus généralement aux sources planimétriques, la donnée LiDAR apporte l'information altimétrique qui permet de visualiser les objets en relief. Associée aux différents modes de traitement numérique, l'information altimétrique permet de produire une documentation beaucoup plus riche qu'il convient d'analyser et d'interpréter.

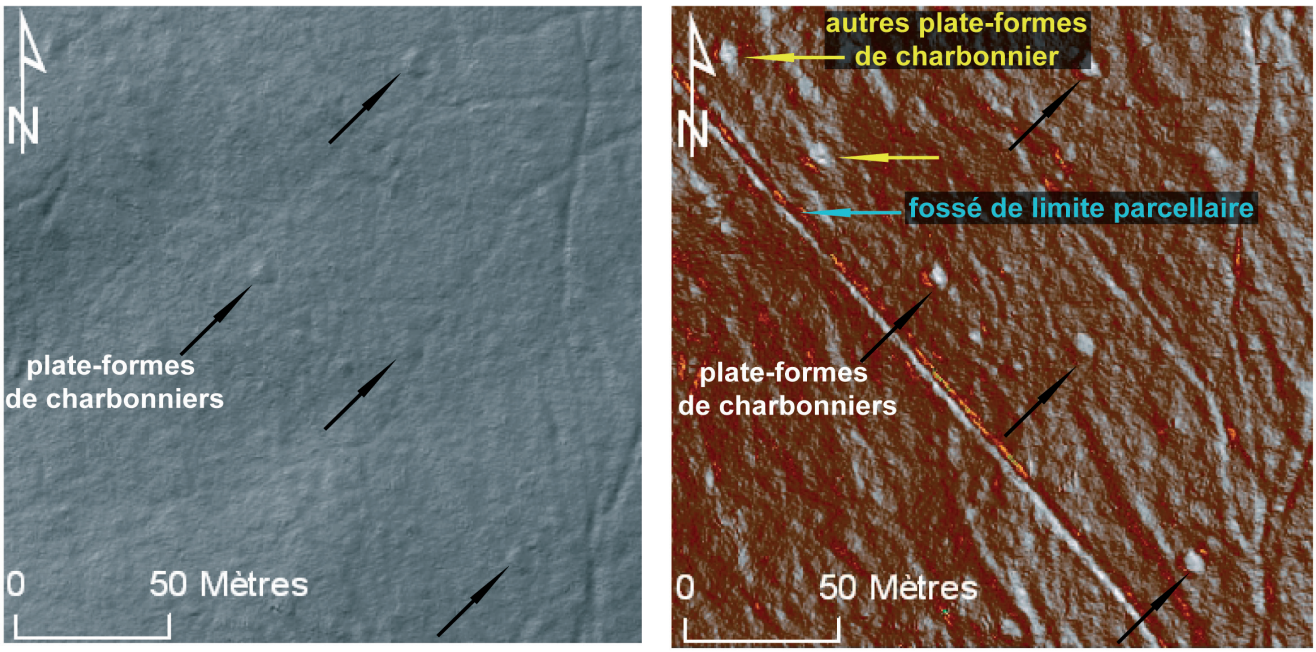

Fig. 5. Plates-formes de charbonniers et fossé limite de parcelle vus suivant un traitement ombrage 315° 45° et suivant un traitement pente (zone de Besançon) (SIG & DAO programme LIEPPEC ® MSHE C. N. Ledoux, C. Fruchart)

On insistera dans ce sens en soulignant le fait que les MNT LiDAR produits jusque-là sont de manière générale sous-exploités car ils ne sont envisagés que comme des images à interpréter pour cartographier des « sites » ou des structures archéologiques ou présumées archéologiques.

Ils sont encore trop rarement utilisés dans des travaux d'analyse spatiale, peut-être du fait de leur poids numérique qui rendent les calculs relativement longs. Une autre explication est certainement liée à l'intérêt des chercheurs qui se sont tournés les premiers vers cette technologie centrée sur la détection de micro-structures d'origine archéologique avec une perspective très locale.

De la détection au paysage

Le travail de télédétection doit se doubler d'un réel investissement de terrain, dont il faut convaincre les tutelles, dans la mesure où l'interprétation première repose sur une surface modélisée d'une part et à partir d'une information univoque – l'altimétrie – d'autre part. Le LiDAR n'est donc pas « bon » ou « pas bon » pour repérer des structures archéologiques, c'est juste un outil dont la maîtrise peut apporter de l'information qu'il convient ensuite d'analyser au regard des informations apportées par d'autres outils.

De l'information sous-exploitée

Une approche qui tend à se développer consiste à multiplier les types d'investigations et notamment de prospection pour compléter autant que faire se peut l'information ou l'absence d'information observée sur le MNT LiDAR. Parmi ces méthodes, on mentionnera la prospection pédestre mais aussi les relevés laser (Challis *et al.*, 2006) ou micro-topographiques locaux à l'aide de GPS et station totale, ainsi que toute la batterie des prospections géophysique (électrique, magnétique, etc.) (Boos *et al.*, 2008). L'avantage de cette dernière technique est qu'elle permet surtout de compléter la topographie des vestiges qui sont désormais enfouis et invisibles ou quasiment invisibles dans le relief actuel. On a clairement pu en avoir un exemple sur le village médiéval de Chamabon situé au sud de l'agglomération de Mandeure (information inédite de C. Laplaige et G. Bossuet, 2010). Toutefois, si la compilation cartographique des données obtenues est désormais acquise avec une grande précision due à l'utilisation d'un environnement SIG, ces informations manquent d'une réelle réflexion, en coupe et en volume, pour être intégrées avec toute l'incertitude que cela suppose. C'est pourtant un challenge important qui permettrait de mieux poser le questionnement d'une part des dynamiques naturelles et, d'autre part, des dynamiques anthropiques qui résultent du cycle des aménagements-réaménagements-déprises, les unes et les autres interférant en permanence. En effet, l'image que nous donne à voir le MNT LiDAR est le résultat de différents processus et les structures que l'on peut y observer sont celles qui sont toujours actives ou qui ont été fossilisées dans le paysage actuel. Comme pour la photographie aérienne on a donc la perception en une seule couche d'une multiplicité de couches « historiques » dont on ne comprend pas nécessairement la combinaison (remplacement, transformation, développement), et ce d'autant plus que les termes de la combinaison ne sont pas homogènes sur l'ensemble de l'espace étudié. Or, plus que l'extraction de chacune des couches historiques, ce qui est intéressant c'est justement d'étudier les modalités de cette combinaison pour mieux appréhender la manière dont les paysages se sont formés. Malheureusement, c'est cette finalité qui est souvent sous-estimée et, comme pour la photographie aérienne dans ses prémices (parfois encore…), elle se résume à une compilation cartographique sans questionnement précis. En outre, à l'instar de la photographie aérienne, elle tombe dans le piège des reconstitutions chronologiques quasiment impossibles du fait du manque de datations, voire de leur incohérence pour un même objet du fait de sa temporalité longue et de son caractère dynamique (Chouquer, 2007).

Si on revient à la nature même de la donnée LiDAR – l'altimétrie – on peut envisager sans peine que la couche actuelle conserve une certaine épaisseur stratigraphique, information qui est sans doute absente de la photographie aérienne ou des sources planimétriques. En ce sens l'information LiDAR présente une réelle originalité et apporte un potentiel supplémentaire dont il serait dommage de se priver en réduisant toute l'information sur un support cartographique. Cette information permet de mettre concrètement en évidence certains modes de transformation qui affectent tout ou partie des structures observées : un talus reprofilé, des plates-formes de charbonniers installées sur des épaulements d'origine anthropique préexistants, des fours à chaux implantés dans une zone autrefois habitée et cultivée, des tronçons de voies successifs mais correspondant à un seul axe de circulation qui s'entrecroisent, par exemple. Grâce au caractère à la fois détaillé et extensif de l'acquisition LiDAR, et bien qu'elles doivent impérativement être vérifiées sur le terrain, ces observations ont le mérite de ne pas être totalement ponctuelles comme c'est le cas des observations de prospection thématique. L'étude de ces observations et l'enregistrement systématique, non pas uniquement de la structure en tant que telle (selon sa forme) mais de sa transformation (ou changement d'état), ouvre donc des perspectives nouvelles pour l'analyse du paysage.

En s'inspirant des travaux initiés pour appréhender la complexité de la fabrique urbaine (Lefebvre *et al.*, 2008), la couverture micro-topographique extensive ouvre tout un champ à explorer, pour mettre en œuvre des modes d'investigation des paysages novateurs (Chouquer *et*

al., 2010), mais plutôt contraints par la localisation et la taille de l'emprise d'opérations préventives et/ou par une approche strictement planimétrique limitant de fait les possibilités de systématisation spatiale.

Dans notre propos, il ne s'agit absolument pas d'affirmer que le LiDAR peut remplacer les opérations invasives (type sondages et fouilles). Bien au contraire, elles sont plus que jamais nécessaires pour vérifier ce qui n'est pas visible en surface et comprendre le fonctionnement complet d'une structure. En outre, elles permettent d'obtenir des éléments de datation en contexte qui sont indispensables pour avoir des repères chronologiques et envisager, même de manière floue, les temporalités qui marquent le façonnage du paysage que nous étudions. De même que nous envisageons avec succès la complémentarité entre la fouille et les prospections pédestres et géophysiques sur des ensembles relativement vastes (Barral *et al.*, 2007 ; Boos *et al.*, 2008), il faut concevoir celle des investigations micro-topographiques (notamment LiDAR) et des investigations de sub-surface avec une véritable intégration des données dans une réflexion en planimétrie mais aussi en coupe, à l'instar de ce qui a déjà pu être proposé sans tomber dans la restitution définitive (Chouquer, 1993 ; Trément, 1999).

Des micro- aux macro-structures du paysage

Associée à d'autres informations, notamment géomorphologique et paléo-environnementale, cette réflexion en plan et coupe devrait pouvoir aboutir à la production de véritables paléo-MNT pour nuancer notre perception du relief actuel et son impact dans les analyses produites, comme cela a déjà pu être esquissé (Nuninger & Ostir, 2005), voire proposé (Castanet, 2006/2007), mais incluant dans leur conception le degré d'incertitude dans la modélisation des modelés. La précision des données LiDAR constitue un véritable outil médiateur pour intégrer des investigations ponctuelles dans une trame locale et appréhender la production d'un paléo-MNT pour l'analyse spatiale qui suppose un nouveau changement d'échelle et la perte d'une partie de l'information ponctuelle au profit d'une généralisation. Il s'agit dans cette modélisation de dégager des tendances intégrant non pas toutes les données mais notre connaissance actuelle de certains phénomènes localisés de manière plus ou moins floue. Sans prétendre vouloir reconstituer la topographie protohistorique, antique ou médiévale, il existe ici un véritable champ de travail interdisciplinaire à développer, long et laborieux, pour produire des modèles comme autant d'outils quantitatifs, souples et non définitifs, capables d'intégrer des connaissances complexes.

Comme nous l'avons abordé, au-delà de la détection et de la cartographie qui priment nécessairement quand on découvre la technique, il est désormais important d'intégrer les objets découverts et les relations qu'ils entretiennent dans un questionnement non seulement local mais aussi micro-régional.

Si de nombreuse structures peuvent être identifiées tels que des enclos, des tertres, des tronçons linéaires (voies, limites parcellaires,…), des fours à chaux, des carrières, des plates-formes de charbonniers, etc., la lecture de leur organisation et de leur rôle dans la mise en valeur de l'espace en est à ses balbutiements quand bien même elle est envisagée. Il y a une rupture actuellement entre les approches de type carte archéologique et les approches thématiques qui est tout aussi préjudiciable que celle qui a existé dans les années 1980 concernant la prospection archéologique de surface. Après avoir satisfait par la richesse quantitative des données produites, elle a déçu par l'indigence qualitative de ces mêmes données. Pourtant l'expérience a montré qu'en analysant ces données dans une perspective globale, il était possible d'en extraire de l'information sur la façon dont elles interagissent et se structurent en ensembles cohérents (Durand-Dastès *et al.*, 1998 ; Van der Leeuw *et al.*, 2003 ; Bertoncello & Nuninger 2010). Nous pensons que cette même étape doit être franchie pour exploiter pleinement les données fournies par la technologie LiDAR.

Parmi les questions que l'on se pose, celle de l'aménagement de l'espace rural dans les modalités de peuplement peut réellement s'enrichir du potentiel offert par la technologie LiDAR en travaillant sur l'articulation des échelles locales et micro-régionales à régionales.

Comprendre l'intégration d'un objet représentant un four à chaux, par exemple, dans des objets linéaires pouvant représenter des limites parcellaires ou des limites d'enclos autour d'une structure d'habitat, va nous informer sur les mutations locales du paysage observé et sur la façon dont des aménagements anthropiques préexistants peuvent éventuellement constituer un élément de choix opportuniste. Généraliser cette observation au reste de l'espace va sans doute être exagéré et contribuer au « fixisme » des scénarios que l'on peut envisager pour le paysage (Chouquer, 2007), ce que l'on fait régulièrement sans s'en émouvoir à partir des fouilles et des sondages paléo-environnementaux. Or, dans notre cas, l'enquête extensive sur la forêt de Chailluz (Besançon) a l'avantage de nous fournir non pas un four à chaux isolé mais plus de deux cents, plus ou moins concentrés dans certaines zones de la forêt, qui n'ont pas toutes les même relations avec les autres objets observés. Une partie des fours est installée dans une zone plane de la forêt qui comprend de nombreuses dolines dont les chaufourniers ont vraisemblablement tiré parti : les fours sont aménagés dans les dolines, qui ont l'avantage de procurer à la fois un front de taille facilement accessible et l'argile nécessaire à la création du four. Un autre groupe est localisé sur un versant et se concentre sans équivoque dans sa partie ouest, sans aucune justification géologique particulière, mais là où on peut également observer d'autres vestiges (pierriers, talus en pierres, enclos comprenant de petits habitats,…). On remarque également que ces fours à

chaux sont souvent proches, deux à deux, d'un autre type de structure : des plates-formes de charbonnier dont près de deux milles exemplaires ont été enregistrés dans la forêt de Chailluz.

À qui et à quoi servent ces aménagements ? À partir de quand se développent-ils et sur combien de temps ? Quels sont les différents facteurs qui peuvent expliquer leur installation et leur concentration dans certaines zones et pas d'autres ? Est-ce le fait d'une utilisation intensive et opportune en ce lieu à un moment donné ou le résultat d'un long processus qui donne cette impression d'intensité, là où il faudrait plutôt voir de la durabilité et de l'opportunisme dans les choix d'aménagement ?

On n'a pour l'instant pas de réponse claire à ces questions mais une série d'hypothèses possibles sur une répartition qui n'est pas complètement le fait du hasard. Si on retient l'hypothèse que les fours sont utilisés à l'époque moderne, la concentration observée dans la partie ouest de la forêt pourrait être liée à l'exploitation de carrières de pierres aujourd'hui disparues mais historiquement connues pour avoir fourni des pierres de taille dites « de Chailluz » et qui ont servi à construire de nombreux bâtiments dans la ville de Besançon ou dans sa périphérie à partir du XVIe siècle. Un manuel du chaufournier du XIXe siècle signale que « *lorsqu'on se trouve à portée des carrières, on peut utiliser avec avantage les morceaux de marbre ou de pierre qui ne sont pas susceptibles d'être travaillés, ainsi que les déchets ou petits éclats qui proviennent de la taille des massifs* » (Biston, 1828 : 34, note 1). Mais l'utilisation de ces fours, ou tout au moins d'une partie, peut tout-à-fait être plus ancienne. Une autre explication pourrait tout simplement correspondre au niveau d'accessibilité privilégié avec le passage tout proche d'un des grands axes qui dessert l'agglomération de Besançon, au moins depuis l'Antiquité. Une autre hypothèse, encore liée à l'expérience même des chaufourniers, pourrait être liée au choix sans risque d'un espace favorable à l'extraction d'une chaux de qualité supérieure. En effet, on préconiserait d'installer les fours là où on a précisément épierré pour des activités agricoles antérieures car ce type de pratique signale qu'on trouvera une qualité de pierre optimale pour la fabrication de la chaux. Dans ce cas, il ne s'agit pas nécessairement de recycler la pierre du bâti comme on a pu le penser de prime abord, mais d'utiliser cette occupation antérieure comme un indice pragmatique de qualité.

Pour tenter de les vérifier ou de les écarter et d'en émettre d'autres sur l'ensemble des structures observées dans la forêt de Chailluz, pour dépasser la simple étude de cas, il est important d'estimer systématiquement les relations qu'entretiennent ces différents aménagements avec d'autres dans un espace plus large. Il est également important de repenser ces relations dans un contexte topographique plus large, en usant des MNT produits pour dériver des analyses géographiques « classiques » d'accessibilité, de visibilité, d'exposition, d'orientation, etc.

Si l'on reprend l'exemple des mutations d'une structure, on peut très bien concevoir que ce qui devrait être analysé ce sont les points névralgiques de l'espace qui enregistrent les transformations des objets (aménagements) et l'intensité de ces changements. Chacun de ces points de l'espace peut être décrit selon des grilles de critères homogènes qui permettent de les comparer selon différents points de vue. Une telle approche permet également de se demander pourquoi on observe une telle activité dans cette forêt alors qu'il n'y en a quasiment aucune trace dans le bois d'Aglans situé au sud de Besançon. Pourtant ce bois présent sur la carte de Cassini et mentionné dans des textes médiévaux est connu pour être une forêt appartenant à Besançon depuis le Moyen Âge, tout comme la forêt de Chailluz. Nous avons pris l'exemple des fours à chaux pour illustrer notre propos, mais c'est l'ensemble des traces d'exploitations artisanales et agro-pastorales (y compris hors forêt) qui doit ainsi être questionné et analysé avec des méthodes permettant ensuite de confronter la dynamique des paysages à la dynamique du peuplement. De ce point de vue, les approches initiées dans le cadre du collectif Archaedyn (Gandini, Favory & Nuninger [dir.], 2008) ouvrent une voie qui demande à être développée.

Conclusions

Comme dans l'essentiel des zones d'études couvertes par une acquisition LiDAR, l'enquête menée sur la zone atelier de Besançon n'en est qu'à ses débuts. L'exploitation des données que cet outil peut fournir, dans une perspective extensive, est par conséquent encore peu développée. La plus avancée des études concerne la forêt de Haye (sous la direction de Murielle Georges-Leroy dans le cadre de l'atelier 1 du programme Archaedyn). Cet état de la recherche est lié au fait que le chantier est très riche, mais lourd, et nécessite une compréhension à la fois technique et conceptuelle de l'information que l'on doit traiter, analyser et interpréter. Compte tenu de ces deux aspects, c'est à notre avis une véritable entreprise inter-disciplinaire qui doit être poursuivie pour exploiter pleinement et scientifiquement ce nouvel outil. Le débat entre spécialistes de la détection, de l'analyse spatiale et les thématiciens a besoin de s'organiser autour de chantiers aux problématiques bien définies pour avancer, à défaut de quoi la technologie LiDAR restera un outil pratique de collecte et d'aide à la cartographie patrimoniale avec, au mieux, une réflexion sur la préservation des vestiges et, au pire, une belle image. Il est donc très important que les archéologues qui s'intéressent aux espaces ruraux, aux systèmes de peuplement, aux dynamiques paysagères et territoriales s'approprient cet outil pour guider et contribuer au développement des traitements en amont du processus.

Projet LIEPPEC, Lidar pour l'Étude des Paysages Passés et Contemporains

MSHE C. N. Ledoux USR 3124, resp. L. Nuninger.

Acquisition des données Lidar en mars 2009, financée par le Conseil régional de Franche-Comté.

Sous la direction de L. Nuninger, le travail de l'équipe ModeLTER (A. Marsetic, F.-P. Tourneux, M. Landré) dans l'élaboration du cahier des charges et le suivi de la mise en concurrence a permis l'acquisition de données Lidar brutes et filtrées, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à 50 cm et une ortho-photographie numérique infra-rouge/couleur sur deux zones de 140 km^2 (autour de Besançon) et 81 km^2 (au sud de Montbéliard) réalisés par la société AERODATA. Les données ont été livrées sous forme de tuiles de 500 m de côté. Ces données sont complétées par les bases de données IGN acquises par ThéMA et la MSHE (Th. Brossard, L. Nuninger, A. Kauffman, M. Landre) ainsi que des données du satellite GeoEye acquise par Chrono-Environnement (J.-F. Viel). Ces données ont fait l'objet d'un contrôle minutieux par l'équipe tant sur les fichiers eux-mêmes que sur le terrain à l'aide de relevés topographiques et GPS (F.-P. Tourneux, G. Bossuet, C. Laplaige, L. Nuninger, R. Opitz) à partir d'une série de prétraitement (L. Nuninger, C. Laplaige, R. Opitz).

Projet CHAILLUZ, Anthropisation d'un milieu forestier : la forêt de Chailluz (Besançon)

MSHE C. N. Ledoux USR 3124, resp. F. Favory, P. Nouvel.

Doctorante allocataire de recherche C. Fruchart, financée par la Ville de Besançon.

PCR Mandeure-Mathay

Chrono-Environnement UMR 6249, resp. Ph. Barral

Doctorant allocataire de recherche C. Laplaige, financé par la Région de Franche-Comté, la CAPM et le CNRS.

Association ARESAC, resp. D. Daval, financée par le SRA de Franche-Comté.

Bibliographie

Barral *et al.*, 2007 : BARRAL P. (dir.), BOSSUET G., KUHNLE G., MARC J.-Y., MOUGIN P., ARCAY D., BATAILLE G., BLIN S., BRIDE A.-S., BURGEVIN A., CAMERLYNCK C., DABAS M., DUMONT A., FORT B., GUILLAUMET J.-P., JACCOTTEY L., JEUNOT L., JOLY M., MARMET E., MAZIMANN J.-P., MOUTON S., PICHOT V., SCHÖNFELDER M., THIVET M. & VANNIÈRE B., *Epomanduodurum*, une ville chez les Séquanes : bilan de quatre année de recherche à Mandeure et Mathay (Doubs). *Gallia*, 64, 2007 : 353-434 et pl. H.T. IV à XV.

Bertoncello & Nuninger, 2010 : BERTONCELLO F. & NUNINGER L., From Archaeological Sherds to Qualitative Information for Settlement Pattern Studies, *in* : NICCOLUCCI F. & HERMON S. (eds.), *Beyond the artefact: digital interpretation of the past CAA 2004, Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 13-17 April 2004 in Prato (Italy). Archaeolingua, Budapest, 2010 : 533 p. http://hal.archives-ouvertes.fr/view_by_stamp.php?label=UNIV-FCOMTE&action_todo=view&langue=fr&id=halshs-00077361&version=1

Bewley *et al.*, 2005 : BEWLEY R. H., CRUTCHLEY S. P. & SHELL C. A., New light on an ancient landscape: Lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site, *Antiquity,* 79 (305), 2005 : 636-647.

Bibracte, coll. 2010. Une nouvelle cartographie pour Bibracte. Réalisation d'un relevé numérique de terrain du Mont Beuvray par la technique LIDAR. http://www.bibracte.fr/fr/entrez-dans-les-coulisses/experimenter/lidar_04_02_03.html (consulté le 20 décembre 2010).

Biston, 1828 : Biston V., *Manuel théorique et pratique du chaufournier,* Paris, librairie Roret, 1828 : 326 p.

Boos *et al.*, 2008 : BOOS S., MÜLLER H., HORNUNG S. & JUNG P., GIS based processing of multiple source prospection data in landscape archaeology, *in* : *Proceedings of the 1st International Workshop on Advances in Remote Sensing for Archaeologyand Cultural Heritage Management, Rome, 30 September-4 October*, 2008 : 113-117.

Castanet, 2006/2007 : CASTANET C., Les apports de la géomatique à la reconstitution des dynamiques fluviales de la Loire moyenne et des interactions sociétés - milieux fluviaux tardiglaciaires et holocènes (Val d'Orléans, Loiret), *Cahier des thèmes transversaux ArScAn, VIII*, 2006/2007 : 190-204.

Challis *et al.*, 2006 : CHALLIS K., HOWARD A. J., MOSCROP D., GEAREY B., SMITH D., CAREY C. & THOMPSON A., Using airborne LiDAR intensity to predict the organic preservation of waterlogged deposits, *in* : CAMPANA S. & FORTE M. (éds.), *From Space to Place – Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, am 4.-7. December 2006*, Rome. 2006 : 93-98.

Chouquer, 1993 : CHOUQUER G., *Histoire d'un paysage de l'époque gauloise à nos jours, entre Bourgogne et Franche-Comté*. Paris, Errance, 1993.

Chouquer, 2007 : CHOUQUER G., *Quels scénarios pour l'histoire du paysage ? Orientations de recherche pour l'archéogéographie*, Coimbra-Porto, 2007 : 408 p.

Chouquer *et al.*, 2010 : CHOUQUER G., JUNG C., FAVORY F. & ODIOT T., *Planification, vie et évolution d'un paysage centurié : Le Tricastin et ses abords*, DARA, 2010 (à paraître).

Doneus *et al.*, 2008 : DONEUS M., BRISE C., FERA M., & JANNER M., Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning, *Journal of Archaeological Science,* 35, 2008 : 882-893.

Durand-Dastès *et al.*, 1998 : DURAND-DASTÈS F., FAVORY F., FICHES J.-L., MATHIAN H., PUMAIN D., RAYNAUD C., SANDERS L. & VAN DER LEEUW S., *Des* oppida *aux métropoles, Archéologues et géographes en vallée du Rhône*. Paris, Anthropos, « Villes », 1998 : 188 p.

Gandini, Favory & Nuninger (dir.), 2008 : GANDINI C., FAVORY F. & NUNINGER L. (dir.), *7 millennia of territorial dynamics settlement pattern, production and trades from Neolithic to Middle Ages. ARCHAEDYN ACI « Spaces and territories » 2005-2007 Final conference - Dijon, 23-25 june 2008*. Pre-proceedings, 2008 : 242 p.

Georges-Leroy *et al.*, 2008 : GEORGES-LEROY M., BOCK J., DAMBRINE E. & DUPOUEY J.-L., L'apport du laser scanneur aéroporté à l'étude des parcellaires gallo-romains du massif forestier de Haye (Meurthe-et-Moselle), *AGER*, 18, 2008 : 8-11.

Hesse, 2010 : Hesse R., *LiDAR-derived Local Relief Models* – a new tool for archaeological prospection, *Archaeological Prospection*, 17, 2010 : 67-72.

Kobler *et al.*, 2007 : KOBLER A., PFEIFER N., OGRINC P., TODOROVSKI L., OSTIR K. & DZEROSKI S., Repetitive interpolation: a robust algorithm for DTM generation from Aerial Laser Scanner Data in forested terrain, *Remote sens. Environ*, 108 (1), 2007 : 9-23.

Kokalj *et al.*, 2010 : KOKALJ Z., ZAKSEK K. & OSTIR K., Application of sky-view factor for the visualization of historic landscape features in lidar-derived relief models, *Antiquity*, 2010 (à paraître).

Lefebvre *et al.*, 2008 : LEFEBVRE B., RODIER X. & SALIGNY L., Understanding Urban Fabric with the OH_FET model based on Social Use, Space and Time, *Archeologia e Calcolatori*, 19, 2008 : 195-214. [En ligne], URL : http://soi.cnr.it/archcalc/indice/PDF19/16_Lefebvre.pdf [consulté le 1er novembre 2009].

Mark, 1992 : MARK, *Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island of Hawaii,* USGS report OF-92-422, 1992.

Nuninger & Ostir, 2005 : NUNINGER L. & OSTIR K., Contribution à la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale de l'Étang de Mauguio (Languedoc, France) : premières approches par télédétection, *in* : BERGER J.-F., BERTONCELLO F., BRAEMER F., DAVTIAN G. & GAZENBEEK M., *Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie. XXVe Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, Antibes, APDCA, 2005 :123-134.

Nuninger L. (dir.), 2008 : NUNINGER L. (dir.), OSTIR K., KOKALJ Z. & MARSETIC A., *Lidor. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental*, Rapport d'ATIP jeune chercheur CNRS : 95 p. (inédit).

Sittler & Hauger, 2007 : SITTLER B. & HAUGER K., Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcellaires anciens fossilisés par la forêt : l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade, *in* : DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., DARDIGNAC C., GEORGES-LEROY M. (éds.), *La mémoire des forêts. Actes du colloque « Forêt, Archéologie et Environnement », 14-16 décembre 2004,* ONF – INRA – DRAC Lorraine, 2007 : 155-161.

Trément, 1999 : TRÉMENT F., *Archéologie d'un paysage. Les étangs de Saint-Blaise (Bouches-du-Rhône)*, Paris, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme-CNRS, 1999 (DAF, 74).

Van der Leeuw *et al.*, 2003 : VAN DER LEEUW S., FAVORY F. & FICHES J.-L., *Archéologie et systèmes socio-environnementaux. Études multiscalaires sur la vallée du Rhône dans le programme Archaeomedes*, Paris, CNRS Éditions.