

Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcelles anciens fossilisés par la forêt : L'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade

Benoît SITTLER⁽¹⁾, Karl HAUGER⁽²⁾

(1) Institut für Landespflege – Universität – D-79085 FREIBURG benoit.sittler@landespflege.uni-freiburg.de

(2) Stadionstraße 28 D- 76437 RASTATT

Résumé

La documentation de vestiges archéologiques butte souvent sur des difficultés particulières dès lors qu'ils ont été fossilisés sous couvert forestier. Ce cas s'applique aussi aux champs bombés comme formes du modelé agraire traditionnel ayant généré une succession de crêtes et de creux, avec des dénivelés de 30 à 60 cm et dont la trame permet de reconstituer l'anatomie de parcelles anciens.

La technique du laser aéroporté développée pour des mesures altimétriques de haute résolution a été testée dans le cadre d'un projet visant une cartographie fine d'un important complexe de champs bombés fossilisés sous forêt près de Rastatt en Pays de Bade. Les objectifs de cette étude étaient de développer un modèle numérique de terrain en 3 dimensions de ces champs conservés en forêt.

Les données ont été acquises lors de missions laser aéroportées commissionnées par le Land Bade Wurtemberg pour la mise à jour des données altimétriques du cadastre. Basée sur la mesure des distances parcourues par des impulsions laser émises depuis un émetteur-récepteur, cette technologie s'appuie sur un traitement préalable des données brutes incluant aussi la sélection des points laser ou échos effectivement réfléchis au niveau du sol. Les coordonnées de ces derniers couplées à l'utilisation d'un SIG servent alors à la réalisation du modèle numérique de terrain. Ce dernier révèle avec un étonnant degré de vraisemblance et à grande échelle le modelé de ces champs fossilisés, témoignant ainsi des capacités insoupçonnées de cette technique à détecter et visualiser en 3-D des structures en relief qui en milieu forestier échappent à l'observateur.

Abstract

The documentation of relics of ancient cultivation practices is a special issue to landscape and heritage preservation agencies. In sites where such legacy of medieval agriculture survived under woodlands, assessing the characteristics of the pattern of furlong and strips is often difficult due to methodological constraints imposed by the obscuring vegetation that prevents systematic observations.

As a new technology for obtaining high resolution measurements of surface elevations, airborne laser scanning has been tested on fossilized ridge and furrow that survived in woodlands near Rastatt in South West Germany. The purpose was to generate 3-D models of these corrugated fields displaying altimetric differences between 30 and 60 cm.

Data for this pilot study were obtained from flight missions carried out by the Land survey agency of Baden Wurtemberg for the purpose of updating comprehensive altimetric data base. Filtering and processing of raw data with subsequent use of GIS enabled to generate realistic 3D terrain models representing the earth's surface void of any forest or vegetation structure. The resolution of this data that creates true-to-life renderings of these corrugated patterns of medieval fields compares favorably with terrestrial mappings, allowing large areas of landscape to be captured as three-dimensional surface data. This technology promises to open historic structures and archaeological sites to more visually detailed, accurate and efficient examination

1. - Introduction

La documentation de vestiges archéologiques fossilisés en relief sous le couvert forestier butte souvent sur des difficultés non seulement liées à la révélation de leur existence dès lors que la végétation les a colonisés depuis des générations, mais aussi à l'exécution de relevés planimétriques. Cela s'applique tout particulièrement pour des structures s'étendant sur de grandes surfaces et présentant des différences altimétriques guère perceptibles. Ce cas de figure concerne entre autres l'archéologie agraire avec ses formes héritées de pratiques agricoles anciennes et que le retour de la forêt a figé.

Si en terrain découvert la prospection aérienne s'est souvent révélée d'une grande efficacité pour mettre en évidence les trames de terroirs médiévaux et des vestiges ruraux qui y étaient associés (Beresford et Saint-Joseph, 1979 ; Braasch, 1996), la télédétection traditionnelle prise pour sa capacité à fournir des vues synoptiques se heurte ici à son incapacité à voir au travers du voile de la canopée.

La technique du laser aéroporté dont l'application dans le domaine civil est récente, a été testée dans le cadre d'un projet visant une cartographie fine d'un important complexe de champs bombés fossilisés sous forêt près de Rastatt en Pays de Bade. Une prospection terrestre avait laissé entrevoir le caractère exceptionnel du site (Hauger *et al.*, 2001) sans toutefois parvenir à en appréhender précisément les mensurations géométriques ainsi que le périmètre réel de ces anciens champs fossilisés.

2. - Problématique

Les champs bombés encore perceptibles dans nos paysages sont des preuves archéologiques attestant d'une ancienne occupation agricole et à ce titre leur documentation permet de jeter un regard sur l'utilisation des paysages à des époques révolues, surtout lorsque des sources narratives scripturales ou iconographiques font défaut. Ce cas s'applique tout particulièrement aux parcelles romaines ou médiévales.

Le modelé même de ces champs bombés se traduisant par une succession de creux et de crêtes espacés de 5 à 20 mètres a été généré par la pratique de labours en ados liée à l'utilisation de charrues à versoir fixe (Ewald, 1969 ; Callot, 1980). L'abandon de ces pratiques qui est allée de pair avec la modernisation de l'agriculture au XIX^e siècle s'est accompagnée d'un nivellement de ces parcelles. Ces modelés n'ont été conservés que dans les situations où ces parcelles furent converties en prairies comme ce fut souvent le cas en Angleterre ou alors lorsque pour des raisons diverses la forêt y a repris ses droits après l'abandon des labours.

La documentation de ces sites par les archéologues agraires s'est souvent limitée à des prospections terrestres

lorsque ces structures étaient facilement lisibles (Ewald, 1969) ou aériennes (Beresford et Saint-Joseph, 1979) mais rares ont été les cas de champs bombés conservés en milieu forestier.

C'est aussi la raison pour laquelle de nombreux sites sont restés ignorés. Ce cas s'applique aussi au Fossé Rhénan où ces champs bombés avaient pourtant marqué de leur empreinte la physionomie des paysages passés (Schwercz, 1816 ; Callot, 1980). Il en est ainsi d'un important complexe de champs bombés dans les Forêts du Bruch de l'Andlau au Sud de Strasbourg.

Pour le site au sud de Rastatt en Pays de Bade (Hauger *et al.*, 2000), les difficultés rencontrées lors d'une cartographie terrestre d'une zone s'étendant sur plus de 1000 hectares et aussi de l'application de méthodes tachéométriques comme autre procédé pénalisé par l'encombrement végétal du milieu forestier ont été à l'origine d'une recherche d'autres techniques susceptibles de supplanter ces approches traditionnelles. A cet effet, les missions de laser aéroporté mises en place par les Services du Cadastre (Landesvermessungsamt Bade-Württemberg) allaient offrir une possibilité de tester l'applicabilité de cette technique pour la restitution du microrelief des champs bombés.

3. - Méthodes

Présentation du site : La zone concernée se situe dans la plaine du Rhin au sud de Rastatt. Elle occupe une ancienne terrasse qualifiée de Stollhofener Platte et dont le rebord domine à l'ouest de 6 à 8 mètres le lit majeur du Rhin. Cette partie exhaussée s'étend sur environ 5 km de longueur et une largeur de 2 à 3 km. Vers l'Est, elle est délimitée par la zone déprimée et marécageuse de la Kinzig Murg Rinne. Ses substrats caillouteux et sableux et l'absence de contact direct avec la nappe phréatique (profondeur du toit de la nappe d'environ 3 à 4 mètres) confèrent à ce site une certaine aridité et pauvreté. Hormis les abords immédiats des villages de Hugelshheim et Iffezheim encore voués à l'agriculture, ce site est essentiellement boisé, avec des peuplements mixtes dominés par les pins, épicéas et hêtres. La grande tempête « Lothar » de 1999 y a localement créé des trouées et des chablis dégagés entre temps, alors que d'autres secteurs ont conservé leur couvert beaucoup plus dense.

Une prospection préliminaire de ce parcellaire à champs bombés avait donné lieu à une première cartographie encore provisoire de tous les champs dont l'observation directe avait clairement fait apparaître l'alternance des creux et des bombements. Cette première délimitation porte sur une surface minimum d'environ 350 hectares (Hauger *et al.*, 2001).

Une première étude historique attribuée à ce parcellaire une origine médiévale, son abandon étant consécutif à la Guerre de Trente Ans, avec retour à une couverture forestière se faisant par le biais d'une friche boisée.

3.1. - La technique du Laser aéroporté

Cette technique qualifiée de LIDAR (Light Detection and Ranging) et déjà appliquée dans divers autres domaines (Ackermann, 1999 ; Pfeifer *et al.*, 1999 ; Von Hansen et Vögtle, 1999 ; Maas, 2002 ; Persson *et al.*, 2002) a pour principe la mesure des distances parcourues par des impulsions laser émises depuis un émetteur-récepteur monté à bord d'un avion et dont le positionnement est assuré par la combinaison d'un récepteur GPS et d'une plate-forme inertielle. Ces systèmes combinent deux entités : un télémètre laser couplé à un procédé d'orientation du faisceau laser pour mesurer la distance le séparant de la surface survolée et des capteurs pour déterminer la position et l'altitude de la plate-forme (fig.1).

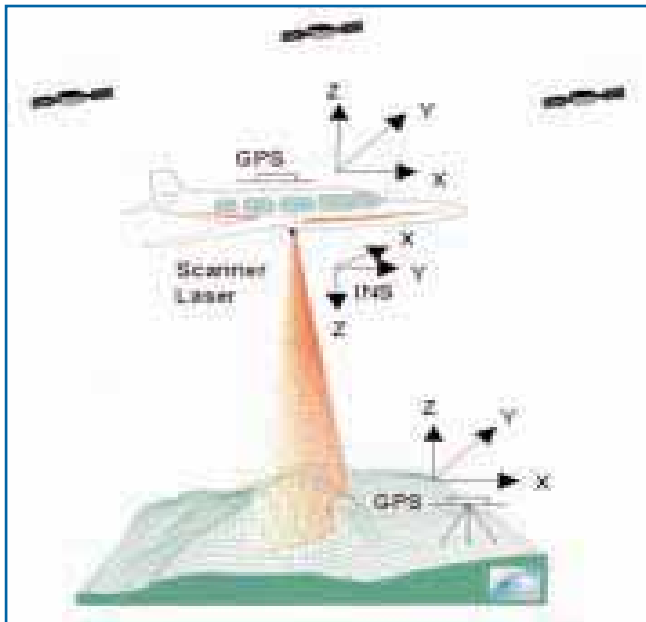


Figure 1 : Le principe de la télédétection par laser aéroporté.

La référence à une station GPS au sol permet d'améliorer la précision géographique du capteur. Le calcul de ces distances repose sur la mesure du temps de propagation de l'impulsion laser. Le balayage des surfaces est opéré à de très hautes fréquences selon des bandes d'une largeur pouvant aller de 300 à 700 mètres, pour des altitudes de vol de l'ordre de 1000 mètres. La densité des points est évidemment fonction de divers paramètres ; selon les systèmes et les applications, elle varie généralement entre 0,1 point et 5 points par m².

En zone boisée ou bâtie, les impulsions laser subissent plusieurs réflexions avant d'atteindre le sol. On parle alors d'échos multiples enregistrés par l'impulsion émise. Le premier écho correspond au premier contact avec l'objet en sursol, soit en forêt la canopée, le dernier écho étant celui qui atteint le sol pour s'y réfléchir (fig. 2). Pour séparer les points du sursol de ceux correspondant effectivement à la surface du sol, il faut donc appliquer des algorithmes de filtrage pour lesquels divers logiciels sont disponibles.

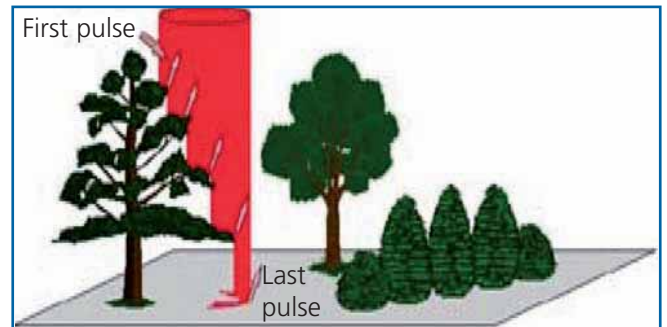


Figure 2 : Impulsions laser en présence d'un couvert forestier (First pulse = premier écho et Last pulse = dernier écho).

Les données brutes livrées sous la forme d'un nuage de points 3D géo-référencé par le prestataire font ensuite encore l'objet d'un traitement ultérieur requis pour la réalisation de modèles numériques de terrain. Ces opérations incluent des calculs de trajectographie et de nuages de points, des classifications semi-automatiques ainsi que des corrections interactives sur stations de photogrammétrie numérique. Les performances de la mesure altimétrique doivent tenir compte de diverses sources d'erreurs qui jalonnent la chaîne d'acquisition et qui peuvent se traduire par une incohérence des données. C'est ainsi qu'outre des erreurs liées au fonctionnement même du système laser, diverses autres imprécisions peuvent affecter la qualité des données (atmosphère, nature des surfaces etc.).

Les coefficients de pénétration varient évidemment en fonction de la densité des couverts et de la saison. En période hivernale, il peut ainsi atteindre 60 % dans des peuplements de feuillus, alors qu'il peut descendre jusqu'à 20 % dans des zones de conifères très denses. Les coordonnées de l'ensemble des points au sol permettent de générer un modèle numérique de terrain (MNT), mais il est aussi possible de n'utiliser que les premiers échos pour restituer un modèle numérique de la surface de la canopée, la différence entre les deux permettant même de déduire le volume de la couche végétale.

3.2. - Les missions de laser aéroporté du Land Bade Wurtemberg

Dans le cadre d'un programme de grande envergure ayant pour ambition de disposer de données altimétriques de haute précision (un point pour moins de 5 m²) pour tout le territoire du Land Bade Wurtemberg (35 000 km²), les services du cadastre (Landesvermessungsamt) ont opté pour le laser aéroporté (Hoss, 1997 ; Gütlinger *et al.*, 2001). Les missions étalées sur 5 ans (2000 – 2005) ont été assurées par la Compagnie Topscan. Les survols qui requièrent un paramétrage préalable (angle et fréquence de balayage, fréquence des impulsions et intervalles de distance) ont eu lieu en période hivernale.

Pour la présente approche, les responsables de ces services (Mrs. Scheyer et Gütlinger) ont gracieusement accepté de procéder à un traitement pour une zone test d'un kilomètre sur un kilomètre au sein du site à champs bombés. Cette démarche a comporté le géoréférencement en coordonnées ETRS89/UTM, les différents points étant discriminés selon qu'ils correspondent à des points au sol (MNT) ou en sursol (MNS). Des extraits de ces données ont ensuite été traités avec le logiciel Erdas Imagine avec contrôle préalable avec Erdas. Ces extraits ont été exportés depuis Erdas Imagine vers des quadrats Arc View en préalable à la création de profils de surface.

4. - Résultats

4.1. - Visualisation de la microtopographie à partir des derniers échos

Pour illustrer les performances de cette approche, on a confronté les résultats obtenus en ne retenant que les données laser émanant des premiers « échos » avec celles résultant des derniers « échos » correspondant aux rayons ayant effectivement touché le sol. Cette comparaison est très instructive, comme en témoigne la mise en parallèle des images numériques obtenues (fig. 3a et 3b). Si 3a rappelle par bien des détails une photo aérienne d'un massif forestier avec ici aussi les différences de densités du couvert résultant des chablis de la tempête « Lothar », c'est un tout autre « pattern » que restitue le modèle numérique de terrain. Ce dernier laisse apparaître de manière incontestable la trame du finage que la forêt a fossilisé, un examen plus approfondi permettant ainsi de procéder à une analyse détaillée de ce modelé agraire.

Une visualisation en 3D du modèle numérique de terrain dérivé du semis de points de dernier écho au sol est illustrée par ces images « en relief » d'extraits de parcelles forestières (fig. 4). Le modelé où se succèdent des crêtes et des creux y est parfaitement lisible, ce type de représentation rendant perceptible la dimension verticale. Dans cet extrait, il est intéressant de comparer aussi les ondu-

lations propres aux champs bombés avec le profil encaissé du fossé (Hardtgraben) profond d'environ 1,5 m et qui en cet endroit coupe les champs bombés.

Ces fichiers une fois visualisés sous forme de profils, rendent perceptibles la dimension verticale de façon très intuitive dans des milieux où le couvert forestier rend l'observation directe très aléatoire comme l'ont illustré les relevés terrestres et tachéométriques.

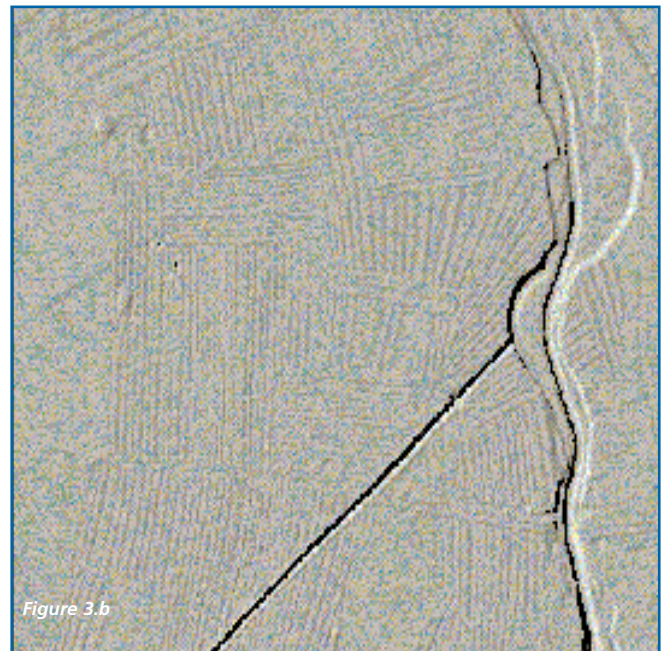
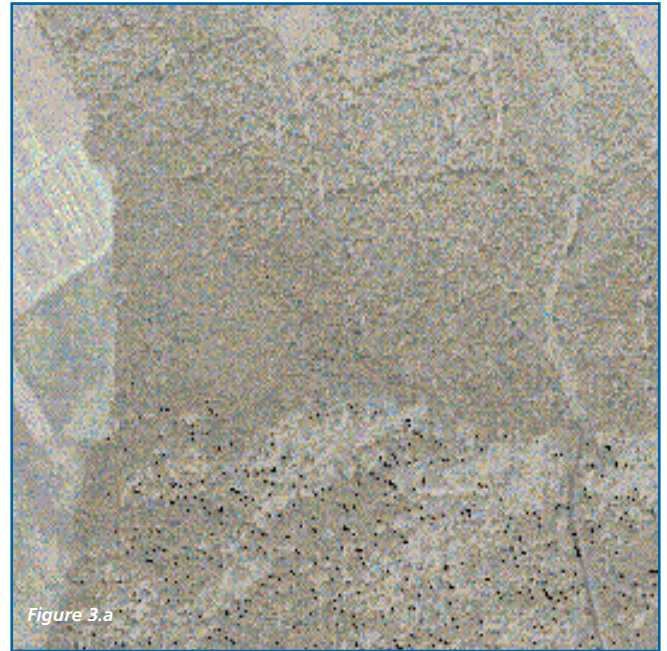


Figure 3 : Modèles numérique de surface (3a) et de terrain (3b) pour ces quadrats de 1km sur 1km.

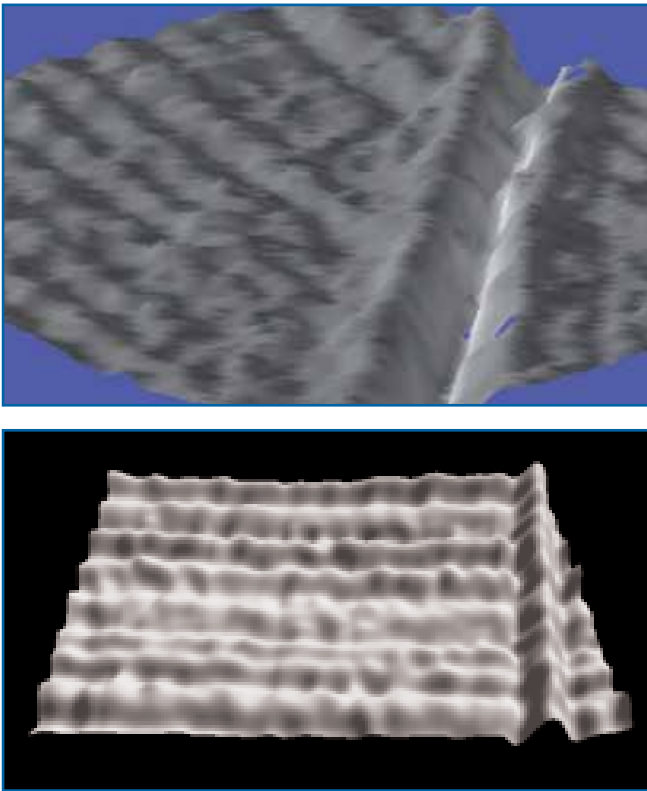


Figure 4 : Extraits du site visualisé en 3D.

4.2. - Les mesures altimétriques et planimétriques des champs bombés

Dans la perspective d'une analyse plus fine des formes planimétriques et du parcellaire dans son ensemble, on a procédé à des tests visant à appréhender les caractéristiques géométriques des champs dont les limites ont été révélées par le modèle numérique de terrain. Ces tests ont été opérés sur des surfaces échantillons et ont porté sur les dimensions géométriques (longueur et largeur) ainsi qu'altimétriques. A cette fin, il a été fait appel à l'extension 3D analyste du logiciel Arc View 3.8, son application ayant porté sur une délimitation manuelle préalable des champs bombés (fig. 5).

Grâce à ce programme, il est possible de déterminer des surfaces ainsi que des "volumes de surfaces". Ces dernières sont appréhendées en tenant compte des différences de niveau. Ce paramètre diffère de l'extension planimétrique en 2D de chaque modèle. La surface planimétrique en 2D est une surface carrée dès lors qu'on observe la surface depuis l'espace. La surface est en revanche la surface réelle et rend compte d'informations pertinentes se rapportant à la rugosité et l'ondulation. Plus la différence entre les deux surfaces est grande, d'autant plus grande sera la rugosité de la surface.

La longueur est déterminée en mesurant la distance au travers d'un champ bombé et la largeur moyenne d'un champ bombé en divisant par sa surface planimétrique avec sa longueur correspondante.

Pour déterminer les amplitudes des ondulations, on a tracé un profil en travers des champs bombés (fig. 6) en utilisant le logiciel adapté. Alors qu'Arc View fournit des profils en lignes, Erdas Imagine fournit des profils spatiaux. Les profils obtenus reproduits dans le graphe rendent facilement compte des différences de niveau. Les distances figurent en abscisse et les élévations en ordonnée.

Alors que dans le cas présent la délimitation des champs bombés (polygones) a été opérée par digitalisation manuelle sur écran, des algorithmes sont envisageables ultérieurement pour procéder à ces recherches de manière automatique. Un tel programme a été mis au point pour la détection de tumuli en Hollande à partir des semis de points laser (De Boer, 2005).

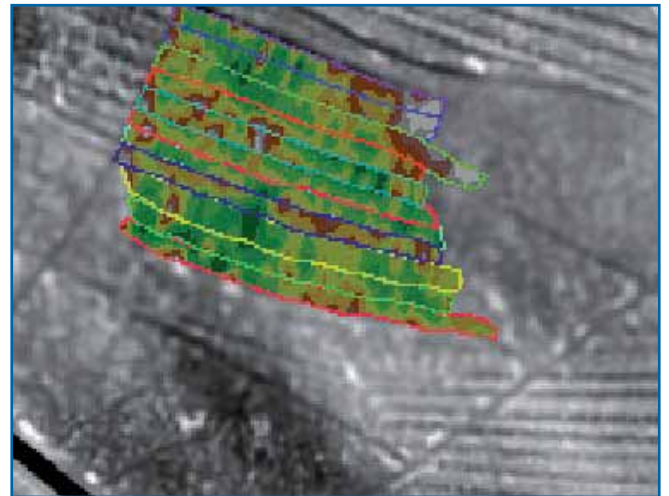


Figure 5 : Délimitation manuelle du périmètre des champs bombés.

5. - Discussion

La manière dont cette approche révèle à l'observateur les trames géométriques de ces levées de terre parallèles séparées par des raies dissimulées sous couvert végétal en font une nouvelle voie d'accès aux possibilités encore insoupçonnées à la connaissance du paysage. Avec une résolution altimétrique de l'ordre de 15 cm dont la précision reste cependant encore à appréhender en fonction des caractéristiques techniques des missions et de la nature des couverts, bien des structures sont désormais accessibles pour des prospections, et ce cas ne concerne pas seulement celles dont la répétitivité des formes saute immédiatement aux yeux.

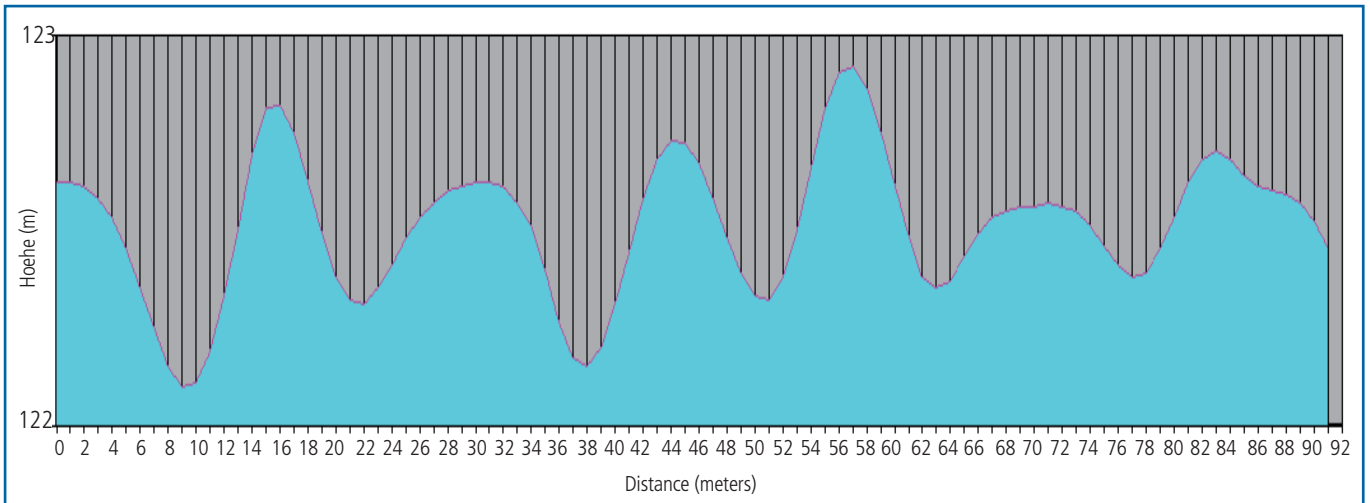


Figure 6 : Exemple de profil en travers.

Comme un examen encore très sommaire l'a révélé, bien d'autres éléments ont pu être détectés, un des avantages étant aussi de pouvoir indirectement dater – dans le relatif – certaines structures en fonction de leur disposition. C'est ainsi qu'il apparaît que les fossés viennent couper les champs bombés. Leur creusement est donc postérieur à ces champs. Dans le cas du long fossé rectiligne du Hardtgraben, sa mention dans les archives du XV^e siècle permet de déduire que ces champs bombés étaient déjà en place au Moyen Âge. En revanche, les champs bombés viennent buter sur une ancienne voie attribuée aux Romains (Römerweg), sans correspondance géométrique avec les champs d'en face, suggérant que cette voie était déjà en place lors de la mise sous labour de ce site.

Si les coûts entraînés par des missions de laser aéroportés restent dissuasifs pour bien des initiatives, le cas du Land Bade Wurtemberg démontre que si l'investissement initial est certes impressionnant, la multiplicité des utilisateurs potentiels peut justifier dans le moyen et long terme la préférence donnée à cette technologie. Du forestier souhaitant appréhender les structures de la canopée jusqu'aux hydrologues intéressés par des modèles numériques de terrain requis pour évaluer les risques d'inondation en passant par les archéologues et urbanistes, les besoins de données aussi précises doivent encourager à s'associer pour engager de telles initiatives.

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont bien voulu apporter leur concours à l'élaboration de cet article. Nous sommes tout particulièrement reconnaissants envers le Landesvermessungsamt Baden-Württemberg pour la gracieuse mise à disposition des données laser ainsi qu'à

René Siwe (Téledétection/ Univ. de Freiburg) pour son aide lors du traitement de ces données. Nos remerciements vont également au Landratsamt Rastatt (Mr. von Rueden et Mr. Schenkel) pour les diverses contributions au projet.

Bibliographie

- ACKERMANN F., 1999, Airborne laser scanning – present status and future expectations, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote sensing*, 54, p.64-67.
- BERESFORD M., SAINT JOSEPH J., 1979, *Medieval England – an aerial survey*, 2nd edition, Cambridge University Press, 286 p.
- BRAASCH O., 1996, Zur archäologischen Flugprospektion, *Archäologisches Nachrichtenblatt*, 1.1, p.16-34.
- CALLOT H.-J., 1980, *La plaine d'Alsace. Modélé agraire et parcellaire*, Univ. Nancy II, 338 p.
- DE BOER A., 2005, Using pattern recognition to search LIDAR data for archeological sites. *The World is in your eyes, Book of abstracts, CAA2005*, p. 95-96.
- EWALD K.C., 1969, *Agrarmorphologische Untersuchungen im Sundgau (Oberelsaß) unter besonderer Berücksichtigung der Wölbäcker*, Tätigkeitsbericht der Naturforschenden Gesellschaft Baselland XXVII, 178 p.
- GÜTLINGER M., SCHLEYER A., SPOHRER M., 2001, Flächendeckendes, hochgenaues DGM von Baden-Württemberg, *Mitteilungen des Vereins für Vermessungswesen*, 48-2, p. 63-77.

VON HANSEN W., VÖGTLE T ,1999, Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laser-scanner-Aufnahmen, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 4, p. 229-236.

HAUGER K., RIEDINGER R., SITTLER B., 2000, Wölbäcker bei Rastatt – eine Dokumentation zur Analyse und Erhaltung überkommener Altackerkomplexe, Kulturlandschaft – *Zeitschrift für Angewandte Historische Geographie*, Jg. 10 (2), p. 113-118.

HAUGER K, RIEDINGER R., SITTLER B., 2001, Wölbäcker im Landkreis Rastatt – *Auf den Spuren mittelalterlicher Ackerfluren*, *Heimatbuch des Landkreises Rastatt*, p. 163-172.

HOSS H., 1997, Einsatz des Laserscanner-Verfahren beim Aufbau des digitalen Geländehöhenmodells (DGM) von Baden-Württemberg, *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*, 2, p. 131-142.

MAAS H.G., 2002, Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data, *Photogrammetric engineering & remote sensing*, Vol. 9, p. 933-940.

PERSSON A., HOLMGREN J, SÖDERMAN U., 2002, Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner, *Photogrammetric engineering & remote sensing*, Vol. 9, p. 925-932.

PFEIFFER N., KRAUS K., KÖSTLI A., 1999, Restitution of airborne laser scanner data in wooded areas, *GIS*, 2, p. 18-21.

SCHWERZ J.N., 1816, *Beschreibung der Landwirtschaft im Niederelsaß*, 450 p.