

POLE D'ARCHEOLOGIE INTERDEPARTEMENTAL RHENAN

Compte-rendu de la journée de travail :

La technique du LIDAR au service de l'archéologie : échanges sur les pratiques et les expériences.

Mercredi 6 février
Conseil Général du Bas-Rhin
(Strasbourg)

Introduction de la journée :	2
1- De l'intérêt de l'utilisation de la technique du LIDAR pour l'étude des sites archéologiques : présentations de plusieurs expériences.	3
■ Le levé LIDAR du massif forestier de Haye : objectifs, méthode, premiers résultats - Murielle Leroy, SRA Lorraine.....	3
■ Prospection LIDAR du Mont Beuvray - Présentation préliminaire des résultats - F. Laudrin, topographe, Bibracte.....	6
■ Premiers résultats de l'exploitation du LIDAR réalisée dans le cadre de l'opération archéologique du hameau médiéval déserté des "Bois de Cestres" en Côte d'Or - Frank Faucher, SRA Bourgogne.....	7
■ Quelques exemples d'applications du LIDAR à des fins archéologiques pour la région de Fribourg - Bertram Jenisch, Service d'Archéologie de Fribourg.	8
■ <i>Einige Beispiele der LIDAR-Anwendung an archäologischen Objekten aus dem Regierungsbezirk Freiburg – Bertram Jenisch.</i>	8
■ The archeological potential of LIDAR generated terrain models: some examples of incidental detections of old field systems in the Upper Rhine Basin - Benoît Sittler, Institut für Landespflege, Freiburg University.	10
■ Les levés LIDAR appliqués à l'étude des sites archéologiques alsaciens : méthode, traitements, et premiers résultats - Florian Basoge (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan), Patrick Clerc (INRAP), Clément Feliu (Université Marc Bloch), Laure Koupaliantz (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan), et Dominique Schwartz (Université Louis Pasteur).....	11
2- Aspects techniques et traitement des données	17
■ Présentation du site web InfoGeo 68 du Conseil Général du Haut-Rhin par Nicolas Kreis (CG68): http://www.infogeo68.fr/	17
■ Elaborer un cahier des charges technique pour des levés LIDAR - Florian Basoge, Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan.....	18
■ Méthodes de chiffrages des données Lidar par Geophenix, sur la base des logiciels Terrascan et Terramodeler (ed Terrasolid) - Marc Daeffler, Société Geophenix.....	20
■ Exploring the potential of Lidar data for archaeology: 3D realtime visualization and DTM generation with the software package 'TreesVis'. Automated object detection explained on an example for linear structures - Johannes Heinzl, University of Freiburg (D).....	23
Conclusions et perspectives de la journée:	25

INTRODUCTION DE LA JOURNEE :

■ Laure Koupaliantz (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan).

Depuis 2005, et les premières réunions autour de la possibilité de faire des survols LIDAR sur le territoire alsacien, le groupe de réflexion qui s'est constitué à cette occasion n'a cessé de s'étoffer, et l'intérêt porté à l'utilisation de cette technique dans le domaine de l'archéologie a crû au fur et à mesure de l'avancement du projet (réalisation des levés, premiers traitements, premiers résultats).

A cette étape du programme, de nouvelles pistes pour améliorer le traitement des données, mais également une première analyse de la pertinence des résultats obtenus, semblent nécessaires. Cette réflexion, nous ne souhaitons pas la mener seuls, mais dans une logique d'échange, de travail en réseau avec les responsables de projets similaires qui ont pu se développer partout en France, et plus largement en Europe, mais également avec tous ceux que l'utilisation de cette technique en archéologie intéressent.

C'est dans cet esprit que cette journée de travail a vu le jour, et nous remercions tous ceux qui ont répondu présent à notre invitation, ainsi que le Conseil Général du Bas-Rhin grâce auquel nous avons pu organiser cette rencontre.

■ Benoît Sittler (Institut de gestion des paysage, Université de Fribourg).

Complementing Laure's words of welcome, I would also like to report you how we are pleased to share the coming discussions about our experiences with LIDAR. In this regard, I would especially like to highlight the participation of the archeological services from Freiburg District, from the remote sensing Department from Univ. Freiburg as well as the participation of the colleagues from Palatinat (Uni. Landau/Koblenz).

Needless to say that we are all eager to learn about the first results of various Lidar surveys in Eastern France. I wish you all a successful meeting here in Strasbourg.

■ Olivier Kayser, Conservateur Régional de l'Archéologie, (DRAC Alsace).

Suivant avec intérêt les réunions LIDAR en Alsace depuis deux ans, je constate une réelle montée en puissance, d'une part avec des résultats prometteurs obtenus sur la région, d'autre part avec une assemblée de participants de plus en plus large comme le montre cette présente rencontre qui réunit les collègues d'Allemagne déjà associés au projet piloté ici par le PAIR mais aussi ceux d'autres régions de France venus nous exposer leur expérience.

Le LIDAR est un merveilleux outil aux images spectaculaires pour qui sait les lire. Il est évident qu'il ne doit pas être utilisé seul mais en constant dialogue avec le terrain en vue de vérifications, pour éviter toute erreur de lecture ou de surinterprétation. De même, dans notre domaine, il est au service de la recherche : à l'instar d'autres techniques ou technologies au cours de l'histoire de notre discipline, le risque est réel de voir un glissement de l'outil vers un des objets de la recherche, et d'oublier ce vers quoi tend l'archéologie. L'expérience peut nous aider à éviter ce piège. Cette journée en est une des occasions avec la mise en chantier d'une réflexion commune sur les problématiques, attentes et protocoles nécessaires.

1- DE L'INTERET DE L'UTILISATION DE LA TECHNIQUE DU LIDAR POUR L'ETUDE DES SITES ARCHEOLOGIQUES : PRESENTATIONS DE PLUSIEURS EXPERIENCES.

L'objectif premier de ce thème était de permettre la présentation d'expériences concrètes, aux problématiques différentes, tant par les échelles de levés, que par les vestiges et les milieux concernés.

■ Le levé LIDAR du massif forestier de Haye : objectifs, méthode, premiers résultats - Murielle Leroy, SRA Lorraine.

Un levé Lidar a été réalisé dans le massif forestier de Haye, situé à côté de Nancy (Meurthe-et-Moselle), dans le cadre d'un programme de recherche interdisciplinaire, regroupant le Service Régional de l'Archéologie de Lorraine (Murielle Georges-Leroy), le centre de Nancy de l'Institut National de Recherches Agronomiques (Etienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey) et l'Office National des Forêts (Jérôme Bock). Ce programme porte sur les habitats et parcellaires fossiles gallo-romains conservés sous couvert forestier sur les plateaux calcaires entre Pont-à-Mousson et Neufchâteau, ainsi que sur leur impact sur la biodiversité actuelle. Ces vestiges se présentent sous la forme de pierriers (murées) ou de terrasses, parfois longs de plusieurs centaines de mètres et hauts de quelques dizaines de centimètres à 1,50 m. Ils délimitent des anciens champs ou pâtures, mais aussi des voies, et sont associés à des habitats également conservés sous forme de microreliefs.

Fin 2006, 7-8000 ha avaient été cartographiés dans le massif forestier de Haye, soit près de 200 km de murées et terrasses, 45 km de voies antiques et de chemins de toutes époques et une cinquantaine d'habitats. Ces travaux de cartographie ont été réalisés au GPS depuis 2000, mais ils comprennent principalement des relevés effectués au décamètre ou au topofil et à la boussole. Les modes d'acquisition de ces données ont entraîné des précisions très inégales, variant du métrique jusqu'à des erreurs de plusieurs dizaines de mètres dans certaines zones. De plus, leur compilation et leur intégration à un système d'information géographique se sont également soldées par une perte de précision due à leur mode de géoréférencement. Comme un recalage total au GPS, outil permettant une approche à grande échelle, n'était pas envisageable compte tenu des moyens humains qu'il aurait fallu y consacrer et de l'inaccessibilité actuelle de certains secteurs suite à la tempête de 1999 (présence de ronces, régénérations denses, ...), un levé Lidar a été envisagé. Outre ces objectifs archéologiques, ce levé doit permettre une recherche sur les données concernant la forêt (hauteur des arbres, densité, etc) puis un croisement des données archéologiques et forestières, toujours dans le cadre de l'étude de l'impact de l'utilisation ancienne des sols avec la répartition actuelle de la diversité végétale. Il faut noter que c'est la mutualisation des moyens des trois organismes qui a permis la réalisation de ce levé, après une année de « gestation » et d'élaboration du cahier des charges.

Le vol Lidar au-dessus de la forêt de Haye a donc porté sur une surface de 113 km², avec une densité de 5,2 points au m². Par ailleurs deux secteurs ont fait l'objet d'un survol complémentaire, avec une plus grande densité de points (10 points/m²) : un secteur de RBI (régénération biologique intégrale) de 80 ha, où aucun travail forestier n'a été réalisé depuis la tempête de 1999 et une bande de 6 km de long comprenant deux secteurs de dispositifs expérimentaux de l'ONF. Les caractéristiques retenues pour ce vol sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

	Zone entière	Secteurs complémentaires
Equipement	Leica ALS50-II	
Hauteur de vol	700 m	
Vitesse de vol	100 noeuds (51 m/s)	105 noeuds (54 m/s)
Fauchée/largeur de bande	428 m	222 m
Recouvrement latéral	30 %	
Fréquence des impulsions laser	115,8 kHz	120,2 kHz
Densité moyenne de points laser	5,26 pts/m ²	10,04 pts/m ²
Angle de scannage	34 ° (+/- 17 °)	18 ° (+/- 9 °)
Nombre d'échos mesurés	4 maximum (premier, dernier, intermédiaires)	
Précision altimétrique des points laser mesurés (écart-type)	8 cm	
Précision planimétrique des points laser mesurés (écart-type)	25-30 cm	

Ce levé a été réalisé par la société G2B (Sintégra) en mars 2007, juste avant la reprise de la végétation. En plus du vol, la première étape de traitement des données a également été réalisée par cette société, c'est-à-dire la classification entre les points sol et les points sursol (points ayant touché la végétation), ainsi que l'élaboration d'un MNT (modèle numérique de terrain) pour le sol et d'un MNE (modèle numérique d'élévation) pour la végétation. Les données, en cours de livraison, le sont sous plusieurs formes : données brutes avec intensité, bande de vol, écho, données classées (sol, sursol, points hauts, points bas) et MNT et MNE.

Concernant les aspects archéologiques, les données livrées sont ensuite importées et utilisées dans le logiciel ArcGis 9.2 (ArcView) et son extension 3DAnalyst (ESRI). Un certain nombre de traitements sont alors appliqués pour les visualiser et les étudier. La visualisation la plus évidente consiste à appliquer un ombrage au MNT ou au TIN¹ généré à partir du semis de points, avec des altitudes et des azimuts différents, mais peuvent également être générées des cartes de pentes, d'exposition ou des courbes de niveau. C'est la combinaison courbes de niveaux à 5 cm et ombrage qui nous a semblé la plus pertinente pour la vectorisation de ces données, même si l'exposition est également utile pour repérer les vestiges. Ces données peuvent également être visualisées en 3 dimensions et des coupes de terrain peuvent être réalisées. Un protocole de vectorisation est en cours d'élaboration pour définir les entités à vectoriser et pour renseigner un certain nombre d'attributs (morphologie, dimensions, etc). Ensuite, ces résultats seront comparés puis combinés avec les données existantes et éventuellement validés sur le terrain, afin d'établir la cartographie la plus complète possible des vestiges.

Ces travaux vont également servir de test pour valider la méthode et surtout ses différents paramètres (notamment en matière de densité de points). Nous disposons en effet d'une base cartographique sur près de 8000 ha de forêt (zone prospectée). Ainsi, la méthode pourra être testée dans différents contextes forestiers : futaies, taillis denses, mais aussi zones forestières totalement détruites par la tempête de décembre 1999, avec présence de nombreux chablis et même zone non dégagée des arbres couchés par la tempête (RBI). La finesse de lecture des microreliefs pourra aussi être appréhendée. Les premières analyses sur la densité des points arrivés au sol (en moyenne 2,4 points au m² dans les zones balayées à 5,2 pts/m²) montrent en effet une grande variation dans la densité, liée d'une part aux bandes de vol (zones de recouvrement), mais aussi aux types de peuplements forestiers.

¹ Le TIN (*Triangular Irregular Network*) ou Réseau de Triangles Irréguliers est un module permettant de modéliser, d'analyser et d'afficher des surfaces sous formes de facettes triangulaire 3D calculées à partir d'un semis de points cotés (z-points).

L'observation des secteurs livrés (environ 52 km²) montre que les structures linéaires, même celles qui sont très peu élevées et quasi imperceptibles à l'œil sur le terrain, apparaissent remarquablement bien y compris dans les zones totalement détruites par la tempête et même dans la zone de RBI où les arbres n'ont pas été dégagés. Ce fait n'était pas acquis d'avance. Beaucoup de nouveaux tronçons de murées et terrasses ont été identifiés et les erreurs de cartographie ont pu être corrigées. Concernant les structures plus ponctuelles, le résultat est également très positif, puisque 7 nouveaux habitats ont été repérés, contre une cinquantaine déjà identifiés, et que la perception de certains habitats connus a été totalement renouvelée. Par ailleurs peu d'habitats déjà repérés (quelques petits bâtiments isolés) présentent une image Lidar peu reconnaissable. Enfin, ce levé va également permettre d'étudier des vestiges non concernés par le programme sur les parcellaires et intéressant d'autres équipes, comme des sites de hauteur fortifiés protohistoriques (notamment le Camp d'Afrique à Messein) ou des minières de fer du Moyen Age.

■ Prospection LIDAR du Mont Beuvray - Présentation préliminaire des résultats - F. Laudrin, topographe, Bibracte.

L'importante diversité orographique du site du Mont Beuvray permet de générer des problématiques historiques riches sur l'interaction de l'Homme et de son territoire. Cependant certains secteurs, comme les pentes du rempart de la Pierre Salvée, ont été longtemps inaccessibles aux appareils de mesures traditionnels (théodolite et GPS) en raison principalement de la densité végétale au sol, du couvert forestier et des pentes abruptes.

Depuis le printemps 2007, cette contrainte majeure a été levée grâce à l'utilisation du LIDAR topographique. La mise en œuvre de cette méthode de relevé et le traitement informatique subséquent, effectués par la société TopoSys, ont permis de transformer le Mont Beuvray en "Mont Chauve", dégarni de la quasi-totalité de son couvert forestier.

Même s'il s'avère que cette méthode d'acquisition topographique est la moins onéreuse pour de si larges surfaces, son coût est lourd. La mutualisation de cette mission avec Tintignac (Corrèze) au sein du projet Leader+ Morvan-Pays de Tulle a permis de faire de conséquentes économies d'échelles.

Le 11 avril 2007, la totalité du Mont Beuvray et des Sources de L'Yonne ont fait l'objet d'une campagne de mesure par balayage laser aéroporté, révélant ainsi le modelé du terrain actuel et une foule d'indices sur sa morphologie antique. Les résultats des mesures ont fait l'objet d'un traitement par le prestataire, se traduisant par un MNT de maillage 0.25m et d'une précision garantie de 0.10m en plan et 0.15m en élévation. MNT complété par une couverture d'orthophotographies dans le visible et le proche infrarouge.

Cette nouvelle macro-vision de haute résolution, dégagée des perturbations végétales, nous permet dorénavant de repérer et de suivre sur de longues distances l'important chevelu des voies antiques environnant le Mont Beuvray, les minières et autres structures ponctuelles.

Les programmes de recherches concernant l'environnement du Mont Beuvray sont les premiers bénéficiaires de ce nouvel outil de cartographie numérique en trois dimensions. Non seulement ils disposent maintenant d'un support d'informations uniformisé, et donc facilement échangeable, mais encore ce support informatique est lui-même source d'informations inédites.

Cette campagne LIDAR s'inscrit dans l'esprit de l'innovation technique de la modélisation du territoire initiée depuis le premier plan en relief de X. Garenne en 1864, au Grand Atlas Topographique du Mont Beuvray mené par F. Schubert, en passant par les magnifiques cartes de J. Roidot ou de l'atlas en couleur d'H. d'Aboville en 1880.

Loin de se substituer définitivement aux atlas précédents, cette campagne LIDAR en souligne l'extrême qualité et permet de combler les lacunes des secteurs inaccessibles au topographe. Inversement les travaux précédents permettent de compléter les données dans les secteurs très boisés où le bruit de fond est trop important pour permettre une mesure fiable.

Ainsi, cette mission LIDAR sur la région du Mont Beuvray est un prolongement du projet GeoTopoCart. L'équipe de Franz Schubert se tourne maintenant vers la comparaison méthodique des données issues des passages au sol (GPS + théodolite) avec celles du LIDAR.

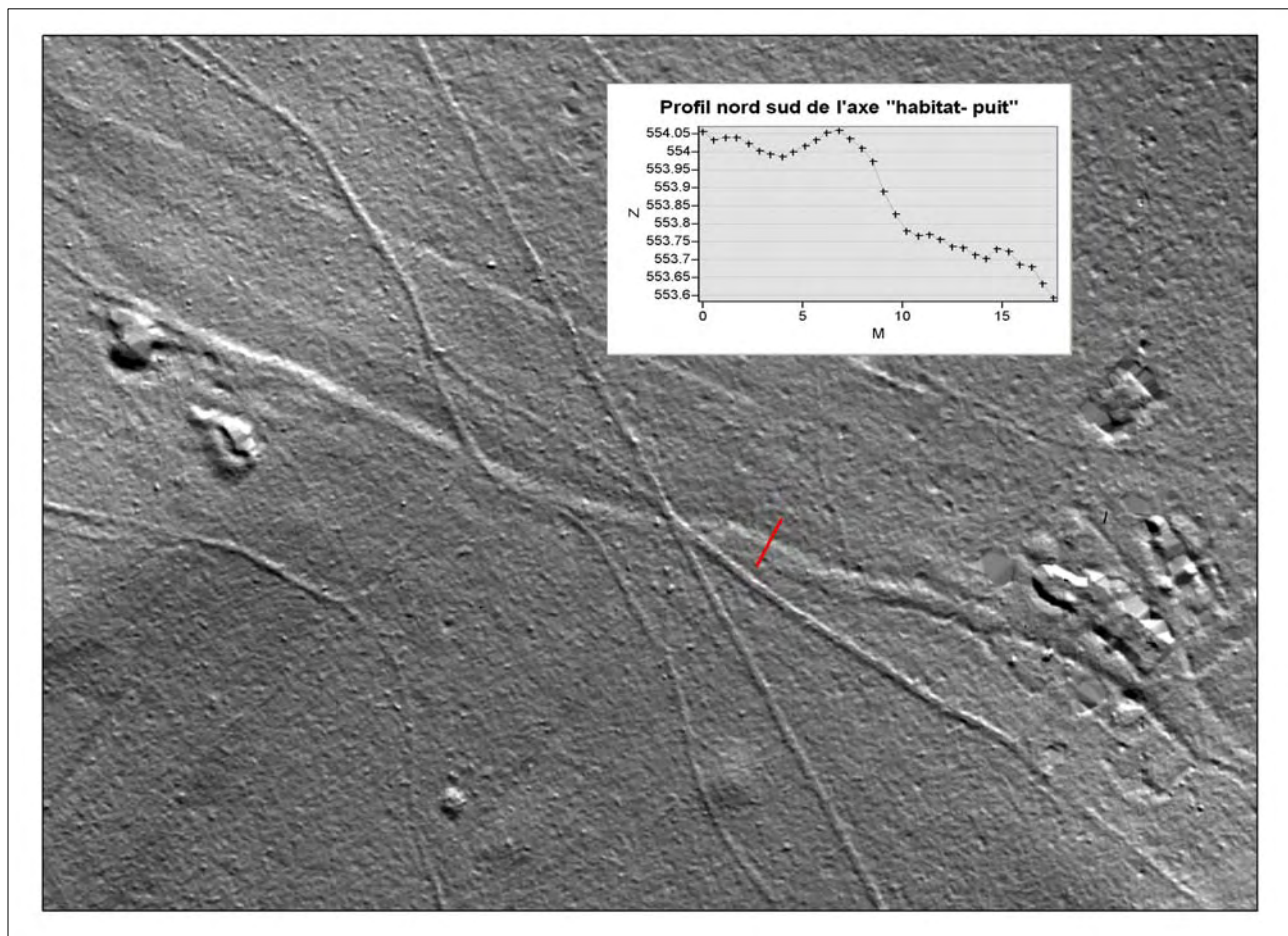
■ **Premiers résultats de l'exploitation du LIDAR réalisée dans le cadre de l'opération archéologique du hameau médiéval déserté des "Bois de Cestres" en Côte d'Or - Frank Faucher, SRA Bourgogne.**

Le site du hameau médiéval déserté des « *Bois de Cestres* » sur la commune de Saint Martin du Mont en Côte d'Or, fait l'objet depuis 2004 d'investigations approfondies. Une équipe pluridisciplinaire s'attache à réaliser sur le terrain, tant sur l'habitat que sur l'ensemble de son environnement forestier, d'une surface de 400 ha, des prospections et fouilles archéologiques (opération programmée sous la responsabilité de P. Beck) ainsi que des analyses pédologiques et phytosociologiques (ENESAD, INRA de Nancy).

L'enquête doit permettre d'apprécier l'organisation et le mode d'exploitation du terroir lié à cet habitat intercalaire rattaché à l'abbaye bénédictine de Saint-Seine.

Un levé Lidar a été réalisé en décembre 2006 sur l'ensemble du présumé finage de l'établissement abandonné au début du XVe siècle. Un premier traitement a été réalisé sur 30 ha autour de l'habitat en multipliant notamment les représentations en ombrage (en variant l'azimut) pour faire apparaître les aménagements anthropiques.

Les résultats obtenus ont entièrement validés les acquis des prospections pédestres en permettant le repérage de nouvelles structures tant ponctuelles (creusements, tertres) que linéaires (chemins). La découverte majeure révélée par le Lidar est la mise au jour d'un chemin reliant l'habitat déserté à un point d'eau aménagé, le « *Puits Gaillard* » distant de 300m. Ce chemin, non perçu en prospection, n'est actuellement visible que par la présence d'un talus de bordure marqué sur un seul côté.



Coupe transversale sur le chemin conduisant de l'habitat (à l'Est) au « *Puits Gaillard* ». (Traitement ArcGIS J.-M. Brayer ENESAD, ombrage du MNT azimut 250, altitude 45°)

■ **Quelques exemples d'applications du LIDAR à des fins archéologiques pour la région de Fribourg - Bertram Jenisch, Service d'Archéologie de Fribourg.**

■ ***Einige Beispiele der LIDAR-Anwendung an archäologischen Objekten aus dem Regierungsbezirk Freiburg – Bertram Jenisch.***

Le Bade-Wurtemberg dispose désormais d'une couverture laser globale d'une résolution toutefois très limitée de 1 point par m². Les données brutes sont accessibles gratuitement pour les institutions et administrations du Land. Leur traitement est assuré grâce au logiciel Surfer8 et Global-Mapper. Les services archéologiques de Fribourg ont opté pour l'exploitation de ces données depuis environ 18 mois, avec comme priorité la prospection de sites sous couvert forestier. A ce jour, 10 sites/ou éléments ont fait l'objet d'une investigation.

In Baden -Württemberg liegen Lidar-Daten flächig vor, allerdings in einem sehr groben Raster von ca.1 Punkt/m². Diese Rohdaten stehen Behörden als Nutzer kostenfrei zur Verfügung. Die Bearbeitung erfolgt mit den Programmen surfer8 und GlobalMapper. Seit etwa 1,5 Jahren befasst sich die Denkmalpflege Freiburg mit der Methode mit dem Ziel, die Anwendung bei der Denkmalerfassung, insbesondere in Waldgebieten, zu nutzen. Bisher wurden im Regierungsbezirk Freiburg 10 Objekte untersucht.

Exemple 1: La Vallée de Sulzburg

Cette vallée abrite une des plus vieilles zones d'exploitation minière en Forêt Noire, dont l'origine remonte au 10^{ème} siècle. D'anciennes fortifications et des châteaux assez mal documentés gardent l'entrée de la Vallée. Les données LIDAR ont ainsi contribué à mettre à jour divers éléments relatifs au Castellberg près de Ballrechten-Dottingen (château médiéval édifié au sein d'anciennes enceintes préhistoriques), au Château Médiéval du Schloßberg ainsi que des reliques de ramparts du Bubenberg près de Sulzburg.

Das Sulzburger Tal ist eines der ältesten Bergbaureviere im Schwarzwald, dessen Anfänge in das 10. Jh. zurückreichen. Im Bereich des Talausgangs liegen mehrere Burgen und Wallanlagen, die schlecht untersucht sind. Durch die Lidar-Daten konnten wichtige Details zum Castellberg bei Ballrechten-Dottingen (mittelalterliche Burg innerhalb prähistorischem Abschnittswall), der mittelalterlichen Burg Schlossberg bei Sulzburg und der prähistorischen Wallanlage Bubenberg bei Sulzburg gewonnen werden.

Exemple 2: Fridingen sur le Danube, Alt-Fridingen

Jouxtant les rives abruptes du Danube récent se trouve une des rares villes désertes de notre région. Prenant appui sur un château, on pense qu'une cité a été édifiée aux abords même du gué franchissant le Danube. Les rendus Laser permettent d'appréhender la structure de cette cité remontant au 12-13^{ème} siècle. Elle était perchée sur un plateau triangulaire sur environ 250 m de longueur et protégée par un mur d'enceinte. Parmi les détails mis à jour on retiendra un porche d'accès ainsi que divers bâtiments adjacent au mur d'enceinte.

Am Steilufer der jungen Donau liegt eine der wenigen Stadtwüstungen unseres Raumes. Angelehnt an eine Burg soll hier eine Stadt gegründet worden sein, die später an die Donaufurt verlegt wurde. Durch die Lidar-Erfassung kann die Struktur dieser Siedlung des 12./13. Jh. erfasst werden. Sie lag auf einem etwa dreieckigen Plateau von etwa 250 m Länge und war von einem Wall umgeben. An Details sind eine Toranlage und mehrere, an den Wall angelehnte Gebäude erkennbar.

Conclusion:

En dépit de leur résolution assez grossière, les rendus Laser se sont avérés suffisamment performant pour visualiser et géoréférencer les éléments constitutifs et autres structures linéaires de la fortification

Fazit:

Die Lidar-Erfassung ist trotz des groben Rasters ein taugliches und schnelles Mittel um Strukturen von Wallanlage und linearen Objekten georeferenziert zu erfassen.

■ **The archeological potential of LIDAR generated terrain models: some examples of incidental detections of old field systems in the Upper Rhine Basin - Benoît Sittler, Institut für Landespflege, Freiburg University.**

Lidar surveys for altimetric purposes have gained considerable popularity in recent years even if it lagged behind for archaeological applications. Its usefulness for assessing features of ancient landscapes was first shown through the investigation of the forested ridge and furrow site of Rastatt in Baden. This project that made use of the altimetric data available from the Land survey agency (LVA Baden-Württemberg) has provided additional insights into the great detection potential of this data base.

In the meantime, additional projects, mainly focused on hydrological issues, that used Lidar data for the generation of terrain models in Baden as well as in Alsace have incidentally revealed various terrain patterns and features that had remained overlooked by heritage surveys.

Some few examples were presented. They included the fully unexpected discovery of ridge and furrow patterns in the floodplain forests of the Rhine River, i.e. within the Tulla Levees near Illingen, suggesting that part of this site was in the past used as arable land despite very high flooding risk. The digital terrain models of the Moder Basin in Northern Alsace also proved quite insightful as they revealed in woodlands of the Forêt de Haguenau and surroundings both remains of medieval ridge and furrow as well as the pattern of an ancient drainage system and related gate and ditch network in the wetland forest of Oberhoffen. In several other examples, the Lidar derived terrain models proved also quite insightful to trace back the ancient anastomosing channels of rectified rivers.

Whenever Lidar data become available for other purposes, a rapid screening for a preliminary detection of indices of heritage structures is encouraged. In this regard, one may also highlight the free access of the Lidar generated terrain models now provided by the Conseil Général du Haut Rhin. 3-D Sceneries retrievable on this homepage (www.infogeo.fr / see bibliothèque des cartes – occupation du sol – ombrages) already allowed some insightful assessments on the degree of disappearance of ancient ridge and furrow in the Sundgau, as compared to the detailed mapping surveys achieved in the sixties by Ewald.

■ **Les levés LIDAR appliqués à l'étude des sites archéologiques alsaciens : méthode, traitements, et premiers résultats - Florian Basoge (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan), Patrick Clerc (Inrap), Clément Feliu (Université Marc Bloch), Laure Koupaliantz (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan), et Dominique Schwartz (Université Louis Pasteur).**

1- HISTORIQUE DU PROJET ALSACIEN

Un premier contact a lieu, lors du colloque "Sylva 2004 - La Mémoire des forêts", organisé par l'INRA, l'ENGREF et l'ONF en 2004, entre Matthieu Fuchs, aujourd'hui directeur du PAIR, et Benoît Sittler, venu présenter le résultat de ses recherches (voir-ci-dessus).

De cette rencontre naît un projet sur le territoire alsacien en 2005, financé par les 2 départements.

Plusieurs partenariats se mettent en place avec des chercheurs issus d'horizons divers :

- Eric Boes, Patrick Clerc, Madeleine Châtelet, archéologues à l'Inrap,
- Clément Feliu, doctorant à l'université Marc Bloch
- Dominique Schwartz de l'université Louis Pasteur
- Pascal Flotté, archéologue au PAIR

Plusieurs sites archéologiques ont été sélectionnés en fonction notamment de leur adéquation avec la technique mise en œuvre. Un responsable correspond à chacun d'entre eux, et la coordination du projet est alors confiée à Laure Koupaliantz, archéologue au PAIR.

La constitution du cahier des charges nécessaire au recrutement d'un prestataire a été facilitée, non seulement par l'aide de partenaires allemands (Andrea Zeeb-Lanz (Denkmalpflege Speyer), Betram Jenisch (Denkmalpflege Freiburg), Folke Damminger et Günter Wieland (Denkmalpflege Karlsruhe), Markus Dotterweich (Uni Koblenz Landau) et Jost Hanecke (Geologie/ Mainz)), mais également grâce à l'aide de Nicolas Kreis, du Service des Rivières (Conseil Général du Haut-Rhin).

La sélection du prestataire a eu lieu fin décembre 2006 tandis que les vols ont été effectués entre le 5 et le 13 avril 2007 par le cabinet Guelle et Fuchs.

Les caractéristiques du levé sont les suivantes :

Paramètres	7 pts /m ²
Angle de scan	19°
Hauteur de vol	Approx. 1400m
Vitesse de vol	Approx. 40 Kt
Fréquence d'acquisition	66000 Hz
Taux de balayage	27 Hz

Les données livrées sont alors analysées par Florian Basoge, topographe au PAIR. Dès le départ, l'un des buts du projet est de permettre aux responsables scientifiques d'être autonomes et de pouvoir manipuler eux-mêmes leurs données.

Afin de permettre aux chercheurs de pouvoir disposer d'un logiciel de SIG, nous avons fait le choix d'une application libre: GRASS.

Une session de formation à ce logiciel a été organisée en décembre 2007 et les données sont petit à petit entièrement mises à disposition des chercheurs.

1- PREMIERS RESULTATS :

Le site archéologique de Mackwiller – Communes de Mackwiller, Diemeringen, Waldhambach, Adamswiller, Rexingen et Thal-Drulingen

Le Pôle d'archéologie interdépartemental rhénan est impliqué dans la mise en valeur d'un site gallo-romain dont quelques vestiges (thermes et mausolée) sont propriété du Conseil Général du Bas-Rhin. La nature de l'occupation n'a pas encore été clairement établie (grande villa ?).

De manière à avancer dans son étude, tout en le situant dans une organisation générale du paysage, plusieurs projets de prospection sont en cours afin de croiser les données obtenues. Le secteur de Mackwiller et des communes avoisinantes comporte actuellement des espaces importants de prairie et de bois.

Les levés, en cours d'exploitation par le responsable scientifique du site, Pascal Flotté, ont déjà révélé un certain nombre d'éléments qui n'avaient pas encore été inventoriés comme l'omniprésence de champs bombés, des paléochenaux, ainsi qu'un monticule qui demeure encore à interpréter lors d'une vérification de terrain.

Les vestiges connus ressortent très bien, que ce soit les éléments bâtis ou les tertres localisés sous forêt.

Le site archéologique du Fossé des Pandours – Communes de Saverne et d'Ottersthal

Le site archéologique du Fossé des Pandours – Communes de Saverne et d'Ottersthal
L'oppidum du Fossé des Pandours est un vaste site fortifié de 165 ha, installé de part et d'autre du Col de Saverne dont il contrôle le passage, occupé à partir de la première moitié du I^{er} siècle avant J.-C. La superficie importante et le couvert forestier relativement dense ont toujours empêché la réalisation de levés topographiques d'ensemble. Cette lacune documentaire est maintenant comblée. Les levés LIDAR ont également permis la mise en évidence d'un important réseau de terrasses, dont l'existence était supposée, mais dans des proportions nettement moins importantes. Quelques points de détail de la fortification ont également été précisés. Deux fossés importants ont été appréhendés : ils prolongent sur plusieurs dizaines de mètres un rempart interne et projettent ainsi les aménagements défensifs vers le fond des vallons qui entourent le site.

Ces différentes découvertes, qui n'ont pour l'instant qu'été faites sur le papier, devront être vérifiées sur le terrain. Elles ouvrent en tout état de cause de nouvelles pistes de recherches sur le site du Fossé des Pandours et sur ses fortifications en particulier.

Le site archéologique du mont Saint-Odile – Communes de Barr, Ottrott et Saint-Nabor :

Le mur païen, qui ceinture sur 10 km le plateau du mont Sainte Odile (Bas-Rhin), est l'objet depuis 300 ans d'un intérêt tout particulier, qui s'est intensifié au début du XXI^{ème} siècle. La redécouverte dans une collection privée d'une soixantaine de tenons en bois qui maintenaient à l'origine entre eux les blocs de l'enceinte et qui avaient été recueillis au XIX^{ème} siècle au lieu-dit du Hagelschloss, a conduit à réaliser une série de datations dendrochronologiques. Leur fourchette chronologique s'est révélée semblable et s'inscrit, sans exception, entre la fin du VII^{ème} et le début du VIII^{ème} s. Ces nouvelles analyses ont ainsi obligé à remettre en question les anciennes hypothèses.

Ces résultats inattendus ont provoqué un regroupement de plusieurs historiens et archéologues pour ré-analyser les textes et les données des fouilles anciennes en fonction de ces nouvelles données. En revanche, aucune étude n'a été réalisée sur le terrain (à l'exception

en 2004 d'une intervention sur la porte d'Ottrott) et il manque encore aujourd'hui un relevé détaillé du tracé du mur et une analyse précise du vaste espace qu'elle enserrait.

Les premiers résultats obtenus sont assez décevants, le mur ressortant assez mal avec un seul travail sur les ombrages. D'autres modes de traitement, notamment l'utilisation des profils en coupe, devrait améliorer la lecture de ces données, et permettre au responsable scientifique du projet, Madeleine Chatelet, d'effectuer une confrontation intéressante avec la documentation déjà réunie pour ce site.

Le site archéologique de Mussig - Communes de Sélestat, Mussig et Heidolsheim :

Le site archéologique de Mussig, sous la responsabilité scientifique de l'archéologue E. Boes, situé au centre de la plaine d'Alsace, est à l'origine un marais, progressivement aménagé par l'homme. Cette implantation s'est faite à l'aide de drainages et du curage d'anciens chenaux. Deux groupes d'une vingtaine de tertres funéraires, datés du X^{IV}e siècle avant J.C au VI^e siècle avant J.C., ont été cartographiés et étudiés. Un projet d'étude de l'histoire des paysages de ce secteur géographique a vu le jour en 2001 et a permis le développement de plusieurs prospections électriques et géoradars qui ont déjà permis d'étudier le contexte archéologique et paleo-environnemental du site.

Les données issues des levés de ce site, dont le groupe de tertres funéraires visibles sur le modèle numérique de surface était déjà bien connu et étudié (voir figure c), ont révélés l'emplacement d'un autre groupe tumulaire, situé sous forêt (figure d), dont la localisation exacte et l'organisation étaient mal connus. Par ailleurs, plusieurs traitements colorimétriques ont fait apparaître de manière spectaculaire le réseau des paléochenaux ainsi que plusieurs éléments rectilignes, interprétés comme d'anciennes digues.

Le site archéologique du district minier de Sainte Marie-aux –Mines :

Le district minier de Sainte-Marie-aux-Mines est le plus grand gisement filonien du territoire français actuel. L'argent (Ag) y a été exploité dès le Xe siècle soit sous forme de minerais, combiné avec du plomb (Galène) ou du cuivre (Cuivre gris) notamment, soit natif (Argent pur) mais d'autres métaux ont aussi été exploités sporadiquement (Arsenic, Cobalt). Plus de 1000 ans séparent les premières traces d'exploitation de la date de fermeture de la dernière mine en 1942. 1000 ans d'histoire des mines, 1000 ans d'histoire des techniques. Les périodes les plus étudiées sont surtout la « Renaissance », c'est-à-dire le XVI^e siècle qui a vu l'essor considérable des exploitations, et les phases ultérieures avec l'utilisation de l'explosif sous terre.

Les exploitations médiévales sont elles encore très peu connues, mais elles font l'objet actuellement de recherches archéologiques attentives qui s'appuieront largement sur les cartographies laser (Lidar) réalisées grâce au Conseil général 68 et le PAIR. L'emprise sélectionnée faisant objet de la levée laser aéroporté englobe la totalité du massif de l'Altenberg, berceau probable de travaux miniers. Elle s'étend sur environ 5 Km², sur une bande d'environ 1 Km de largeur pour un peu plus de 4 Km de long.

Les particularités de ce site sont nombreuses et apportent autant de cas d'études pour la mise au point des techniques Lidar que pour l'archéologie minière et l'histoire des paysages. Les couvertures végétales sont variées, allant de la simple pâture (près herbes rases) à la forêt la plus dense (conifères, feuillue et forêt mixte), dans un milieu de moyenne montagne allant d'une altitude de 400 m à près de 1000 m et avec des pendages parfois importants. Le relief inhabituel, à la différence des sites de plaine (Mussig), a engendré des conditions de vol délicates et de sérieuses difficultés techniques pour l'opérateur lors de l'acquisition des données. La conséquence la plus inattendue est l'augmentation de la densité des impacts au sol.

Plusieurs centaines de sites miniers sont localisés dans l'emprise et s'étalent le long des crêtes du massif. Il s'agit de galeries souterraines et de puits de mines plus ou moins développée en profondeur qui comportent chacun, en surface, des tas de déblais stériles issu de ces travaux : les haldes.

Les haldes, souvent seules traces visibles d'un orifice effondré depuis longtemps, s'enchevêtrent les unes sur les autres dans les secteurs les plus denses, dans des formes, des dimensions et des volumes variés. Des bosses, des creux, des trous... autant de haldes, de puits effondrés ou d'entrée de galerie de mine.

Sur l'affleurement d'un filon, les travaux miniers peuvent ressembler à des chemins creux aux formes et aux dimensions irrégulières. Le principal intérêt pour l'archéologie est évidemment une cartographie précise de l'ensemble de ces ouvrages. Même si la très grande majorité de ces vestiges a déjà été localisé, ils ont alors été topographiés « à la main », c'est-à-dire à l'aide de décamètre et d'une boussole et figurés sur un fond de carte IGN au 1/25 000.

Un autre objectif est possible par le calcul des volumes de déblais. En effet, grâce au géo-référencement et à l'aide de calculateur et d'algorithmes restant à établir, nous devrions pouvoir disposer de mesures quantitatives des volumes de déblais miniers et ainsi estimer l'importance des travaux sans même pénétrer le monde souterrain. À titre de confrontation, quelques haldes bien ciblées (halde de la Mine Patris par exemple) ont été topographiées à l'aide de techniques topographiques terrestres (Tachéomètre, GPS différentiel) et pourront faire l'objet de ces même évaluation de volume.

Les résultats obtenus lors des premières visualisations des modèles numériques sont éloquentes. Tant et si bien que le travail de DAO et CAO qui doit en résulter semble titanesque, sans parler de l'interprétation scientifique pour l'archéologie minière et dans les autres domaines de l'archéologie (histoire des paysages, activité agricole, etc) et des autres sciences pouvant exploiter cette matière première numérique.

Du coup, pour Sainte-Marie-aux-Mines nous avons pour le moment concentré notre temps essentiellement à la maîtrise des logiciels de SIG et en particulier du couple GRASS + QUANTUM (en accès libre). Ces logiciels nous semblent suffisants pour le traitement que nous souhaitons appliquer aux données. Les outils qu'ils possèdent sont très nombreux et recèlent probablement de nombreux avantages, notamment en matière de visualisation.

Les représentations des modèles numériques font logiquement l'objet de confrontations avec le terrain afin d'éviter les erreurs de lecture et donc d'interprétation. Certains rendus plus démonstratifs peuvent être adaptés en fonction des sites et des sujets à traiter. Chacune de ces images est un outil différent à exploiter avec objectivité en fonction de son but, aussi bien par l'archéologue minier sur le terrain dans le cadre de sa recherche, que par le même personnage lors d'une présentation à un public. Ce dernier justement est autant intéressé par les résultats scientifiques que par les techniques qui ont permis de les obtenir. Son approbation ne passera que par une vulgarisation du discours expliquant ces méthodes complexes, ces outils nouveaux tant pour lui que pour nous.

Au regard des nombreuses présentations d'exemples français et étrangers et à notre grande satisfaction, le thème « minier » semble être fédérateur. Du Mont d'Afrique (en Lorraine) jusqu'en Forêt Noire (Allemagne), de Bibracte (Mont Beuvray) à Sainte-Marie-aux-Mines, il semble de plus en plus intéressant de développer cette thématique par des groupes de travail et/ou une table ronde.

Les collines sèches de Rouffach-Osenbach : étude d'un parcellaire ancien

Sur les collines calcaires sèches de Rouffach et environ on trouve en abondance des murgers résultant de l'épierrement de parcelles agricoles, ainsi que d'autres vestiges qui y sont associés : terrasses, murets,... Une étude préliminaire sur une des collines (Bickenberg à

Osenbach) avait permis de dater d'entre les VIII^e et XIII^e siècles les structures qui y ont été analysées. L'ensemble constitue vraisemblablement les vestiges d'un parcellaire médiéval. De telles structures sont bien connues dans de nombreuses régions françaises, mais étaient complètement inconnues en Alsace, d'où le choix de cette zone pour l'opération laserscanning.

Le dépouillement des images ne fait que commencer. Seule une zone test a été étudiée à partir d'une image jpg. Les premiers résultats confirment l'intérêt de la méthode, qui a permis de corriger une cartographie faite par des moyens classiques sur le Bickenberg. La finesse du laserscanning permet de mieux délimiter les structures, de les compléter dans les zones difficilement accessibles car occupées par des fourrés de prunelliers impénétrables. Deux autres résultats importants ont été aussi quasi immédiats : l'association des vestiges lithiques à des systèmes de terrasses parfois peu visibles sur le terrain, et l'extension de ces vestiges sur des zones où nous ne nous attendions pas à en rencontrer, à savoir des sols bruns acides relativement profonds (60-70 cm), développés sur des grès vosgiens. Là également ces structures sont constituées du matériau géologique local. En revanche, il apparaît qu'il est impossible de se soustraire à une phase de validation sur le terrain, et cela pour deux raisons : la confusion possible entre deux types de structures totalement différentes (un tas de branchage et un murgé circulaire ont la même signature sur le MNT), et le fait que certaines structures ressortent mal sur l'image analysée en raison de leur taille ou de l'ombrage retenu. Toutefois, cette phase est grandement facilitée par le « fil d'Ariane » que constituent les structures identifiées au laserscanning.

Le Rossberg : étude des phases modernes d'utilisation du milieu

Sur le Rossberg, massif montagneux séparant les vallées de la Doller et de la Thur, des travaux préliminaires ont montré l'existence d'une phase de défrichement forestier au XVIII^e siècle. Cette phase a suivi l'abandon des pâturages de montagne pendant la guerre de 30 ans (à partir de 1634 précisément), et correspond à une phase de réouverture du milieu entre 1722 et 1785. Cette réouverture a été effectuée par arrachage des arbres. Un travail de cartographie classique a été fait sur le terrain, pour relever au GPS les microtopographies de « paléochablis » résultant de cet arrachage. Cette opération s'est révélée fastidieuse et impossible à réaliser de façon exhaustive. Le laser a montré à cette occasion toute son utilité et sa puissance, sur une zone test étudiée en image jpg..

Les formes relevées sont facilement identifiables, même si là aussi une confirmation terrain est indispensable. Il semble même possible de différencier les « paléochablis » anthropiques du XVIII^e siècle des chablis actuels, liés aux tempêtes récentes. D'autres formes apparaissent également, notamment des plateformes de charbonnage dont l'inventaire-terrain n'avait été effectué que partiellement. Les données laser intégrales nous sont parvenues très récemment, et sont en cours de traitement dans le cadre d'un mémoire de master. Deux aspects sont privilégiés : (a) la reconnaissance des formes (chablis, paléochablis anthropiques, plateformes de charbonnage, murets,...) sur l'ensemble de la zone ; (b) la spatialisation de l'ensemble de ces données, pour vérification de l'hypothèse selon laquelle les paléochablis correspondent bien au défrichement entre 1722 et 1785, et que les plateformes de charbonnage leur sont bien associées, ce qui semble être le cas au vu des observations de terrain (mais celles-ci sont partielles).

Ceci témoignerait alors d'une phase de charbonnage opportuniste, simplement liée à l'ouverture des pâturages, et non pas d'une action continue en domaine forestier.

2- PERSPECTIVES :

L'étape suivante du projet devra permettre de compléter les réflexions sur l'analyse et l'interprétation des données issues de ces premières levées. Dans cette optique, nous espérons que cette journée de travail permettra de mettre en place une logique de travail en réseau.

Par ailleurs, un des objectifs à très court terme du projet sera de pouvoir s'intégrer dans un cadre plus formel afin de permettre aux chercheurs qui en font partie d'obtenir des jours "recherche" auprès de leurs institutions respectives. En effet, la confrontation des données acquises avec des vérifications de terrain, indispensable à toute analyse des résultats, ne pourra se faire que dans ces conditions.

Enfin, afin d'étendre nos réflexion à de nouveaux sites, milieux ou problématiques, de nouvelles campagnes d'acquisition sont en cours : en effet, un levé LIDAR, effectué sur la totalité du tracé de la deuxième tranche de la LGV Est, et financé par Réseau Ferré de France, à eu lieu fin février. Les données pourront être exploitées dans le cadre d'opérations archéologiques préventives.

2- ASPECTS TECHNIQUES ET TRAITEMENT DES DONNEES

- Présentation du site web InfoGeo 68 du Conseil Général du Haut-Rhin par Nicolas Kreis (CG68): <http://www.infogeo68.fr/>

The screenshot shows the InfoGeo68 website interface. At the top, there is a navigation bar with the logo of the Conseil Général Haut-Rhin and the text 'InfoGeo68 Système d'Information Géographique du Haut-Rhin'. Below this, there are several menu items: 'BIBLIOTHÈQUE DE CARTES', 'CONSTRUISEZ VOTRE CARTE', 'SURVOL EN 3D', 'VUES AERIENNES', 'NOUS ECRIRE', 'LIENS', and 'AIDE'. There is also a 'Se connecter' link under 'Accès partenaires'.

The main content area is divided into several sections:

- Clip de présentation d'InfoGeo68:** A blue box with the logo and the text 'L'Acteur de votre quotidien' and a button 'Lancez le clip'.
- Bibliothèque de cartes:** A section with four map thumbnails and the text: 'Découvrez des cartes dynamiques préparées pour vous permettre de mieux connaître votre territoire'.
- Construisez votre carte:** A section with a puzzle map and the text: 'Vous préférez construire votre propre carte à partir des 300 séries de données existantes, cet espace est pour vous'.
- Vue aérienne:** A section with an aerial view of a town and the text: 'Découvrez des vues aériennes de votre territoire'.
- Survol en 3D:** A section with a 3D topographic map and the text: 'Découvrez des vues en 3D de votre territoire'.

At the bottom left, there is an 'Actualités' section with the heading 'Découvrez :'. It lists several items:

- les déchèteries à proximité de chez vous
- la vue du département en 1760
- GERPLAN : Plan de Gestion de l'Espace Rural et Périurbain
- les arbres remarquables

■ **Elaborer un cahier des charges technique pour des levés LIDAR - Florian Basoge, Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhéna.**

La présentation sur l'élaboration d'un cahier des charges techniques pour les levés LIDAR a abordé les points suivants: la définition de besoins, une précision sur les données techniques, les contraintes climatiques, le type de rendu et enfin le droit de propriété des données.

Définition des besoins

Dans le cahier des charges, il est bien d'expliquer le contexte. Une présentation rapide du ou des sites à lever est appréciable. Cette présentation sera accompagnée d'une explication sur l'apport du levé laser aéroporté sur un levé terrestre. Enfin une description des objets recherchés peut être faite: (forme, dimension, hauteur)

La précision

La précision altimétrique est l'association de différentes erreurs. Les principales sont l'erreur de mesure du GPS et l'erreur de mesure du LIDAR. On arrive donc à une précision de 10 à 15 cm actuellement.

La précision planimétrique est elle aussi l'association de différentes erreurs. L'erreur GPS est toujours présente. La tache au sol mesurant environ 10cm de diamètre en fonction de la hauteur de vol, on atteint une précision maximale de 30-40cm

La densité de points

La densité est le nombre de point levé au mètre carré. Plus la densité est élevée, plus il y aura de chance que le rayon passe sous la végétation et que l'on ait donc un point au sol.

En fonction du type de végétation on peut passer de 4 pts/m² pour une végétation peu dense à 8/10 pts/m² pour des zones forestières avec des conifères. Il faut penser que même avec 10pts/m², si les conifères sont denses, on risque de ne pas avoir de point au sol de façon régulière.

Les points de calage

Le prestataire doit être en mesure de fournir une synthèse des points de calages utilisés, leur écartement ainsi que la précision de leurs coordonnées. Il fournira par ailleurs le résultat des contrôles réalisés sur les surfaces de références. Le client peut se réserver le droit de réaliser un contrôle externe pour vérifier les résultats fournis.

Les contraintes climatiques et végétaives

- ~ Le levé doit être réalisé
- ~ hors période végétative
- ~ en période de basses eaux: l'eau absorbant le rayon
- ~ hors période de neige: surépaisseur qui masque les irrégularités du sol

Le rendu des résultats

- ~ Il faut préciser dans le cahier des charges:
 - ~ le système de projection de coordonnées planimétrique désiré: Lambert I, II, III, Lambert 93.
 - ~ le système altimétrique: NGF-IGN69 pour la France
 - ~ obtenir les semis de points bruts géoreferencés classés et non classés ainsi que les différents échos
 - ~ la résolution du raster pour le MNS et le MNT
 - ~ le type de format de fichiers (xyz colonné, shape pour le semis / ESRI, Ascii grid pour les raster)
 - ~ la taille des dalles (500m/1000m de coté)
 - ~ un rapport avec les vérifications internes réalisés ainsi que les surfaces de référence, le plan de vol...

Les droits de propriétés

Il faut préciser dans le CCTP que le maître d'ouvrage est seul propriétaire des données et qu'il en aura l'entière disposition

Cette aide pour la réalisation d'un cahier des charges n'est pas exhaustive. Il s'agit d'un certain nombre de points à aborder dans le cahier des charges mais il est possible de rajouter d'autres clauses plus restrictives ou plus spécifiques en fonction du but du levé.

■ Méthodes de chiffrages des données Lidar par Geophenix, sur la base des logiciels Terrascan et Terramodeler (ed Terrasolid) - Marc Daeffler, Société Geophenix.

GeoPhenix est une société d'acquisition et de traitement de données aériennes numériques, et en particulier de données Lidar. Elle compte une cinquantaine de personnes dont 15 spécialisées en Lidar. GeoPhenix dispose de deux scanners Lidar aux spécifications techniques complémentaires : un Leica ALS50-II MPiA (150 kHz) et un Riegl LMS-Q560 (133 kHz), opérés à bord d'avions ou d'hélicoptères.

Les traitements de données se décomposent en deux phases :

- les prétraitements, à l'issue desquels nous disposons des semis de points géométriquement corrects et non classés
- les post-traitements, qui consistent à classer les points laser et réaliser les produits finaux, comme les MNT et MNS grille par exemple.

Pré-traitements des données Lidar

1. Calcul de la trajectoire du scanner

- Calcul de la trajectoire GPS : cette trajectoire est calculée en mode différentiel, en s'appuyant sur les stations GPS mises en place au sol pendant les vols et/ou les stations GPS permanentes disponibles dans les environs de la zone à lever. Une analyse détaillée des données GPS brutes permet si nécessaire de résoudre des problèmes de mesures GPS pendant les vols.
- Combinaison des données GPS et IMU (*Inertial Measuring Unit*) : les données GPS sont enregistrées à une fréquence de 1 ou 2 Hz, tandis que les données IMU sont enregistrées à une fréquence de 200 Hz. Le GPS offre une position absolue de bonne qualité, tandis que l'IMU dérive rapidement dans le temps. Le GPS mesure des positions de l'avion, tandis que l'IMU mesure les déplacements et les orientations (angles) du scanner dans l'espace. C'est pour ces raisons qu'il est nécessaire de combiner les données GPS et IMU, afin d'obtenir *in fine* une précision sur la trajectoire de l'avion de 3 à 5 cm en X, Y et Z.

2. Calcul du semis de points laser brut

Le calcul des coordonnées XYZ des points laser est réalisé en s'appuyant sur la trajectoire du scanner, les mesures d'angles et de distances du scanner ainsi que les paramètres de calibration du scanner laser.

L'output en format *.LAS est le plus couramment utilisé.

3. Ajustement des bandes laser et calcul des semis de points laser géométriquement corrects

En exploitant les zones de recouvrement entre les bandes laser (les bandes parallèles ainsi que les bandes transversales), les erreurs résiduelles de calibration du scanner sont calculées pour le vol traité. Ces erreurs sont les erreurs angulaires et le facteur d'échelle du scanner.

Une fois ces erreurs calculées, les corrections sont appliquées à l'ensemble des données du vol, et la cohérence du bloc de bandes vérifiée une dernière fois.

Post-traitements des données Lidar

1. Classification semi-automatique des données laser

GeoPhenix réalisé la classification des données laser avec le logiciel TerraScan (éditeur TerraSolid).

Le processus est itératif et semi-automatisé. Il peut se décomposer comme suit :

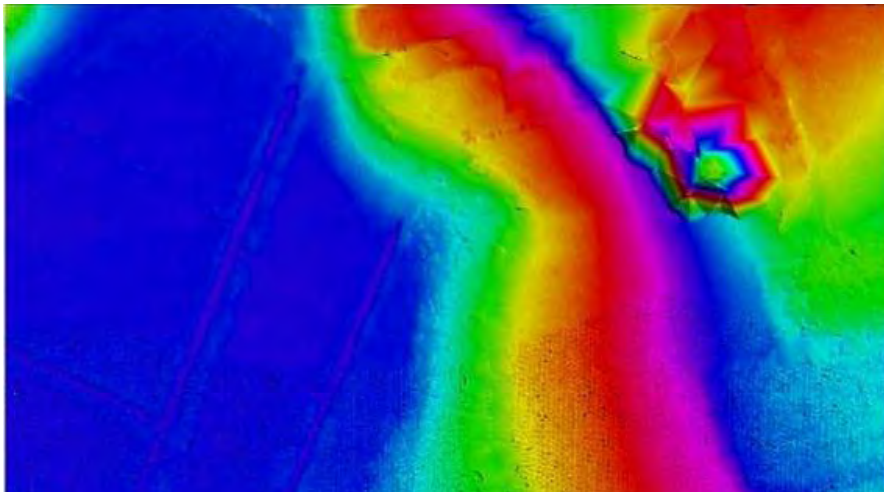
1. analyse visuelle des caractéristiques du terrain
2. détermination des paramètres optimaux pour la classification
3. analyse des résultats obtenus avec les paramètres testés
4. ajustement des paramètres
5. identification des zones nécessitant l'utilisation de paramètres spécifiques.

2. Edition manuelle de la classification

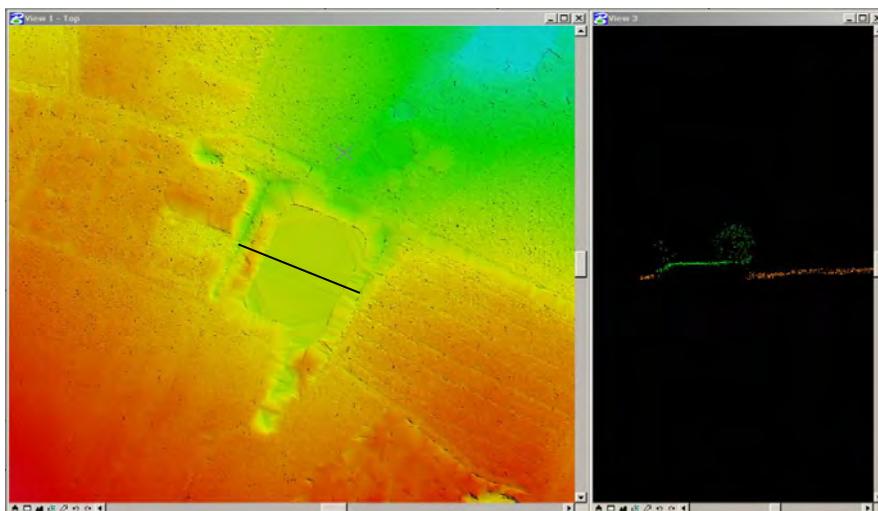
La classification semi-automatique laisse un certain nombre de points laser mal classés. L'objet de l'édition manuelle est de les repérer et de les affecter à la bonne classe.

Les principaux outils utilisés pour réaliser cette édition manuelle sont des coupes transversales fixes ou mobiles, ainsi que le MNT observé en teintes hypsométriques et ombré.

Exemple de MNT en teintes hypsométriques pour l'identification des erreurs de classification :



Exemple de coupe transversale pour les corrections de classification :



Conclusion

Une partie importante du traitement des données Lidar est automatisée, mais l'intervention humaine reste indispensable pour obtenir une bonne qualité de rendu des MNT. Ceci est d'autant plus vrai pour les levés archéologiques réalisés par Lidar. En effet, un filtre de classification un peu trop « dur » pourra faire disparaître certaines structures du MNT alors qu'elles existent sur le terrain. Inversement, un filtre trop « mou » laissera de nombreux éléments végétaux bas dans le MNT, rendant l'interprétation visuelle plus délicate. Les corrections manuelles, réalisées en étroite collaboration avec les archéologues, restent la meilleure garantie d'un résultat optimal sur les MNT laser.

- **Exploring the potential of Lidar data for archaeology: 3D realtime visualization and DTM generation with the software package 'TreesVis'. Automated object detection explained on an example for linear structures - Johannes Heinzl, University of Freiburg (D).**



The information that can be derived from airborne Lidar data is of high value for the archaeological prospection. The breakthrough of airborne laser scanning opens a new chapter in remote sensing. Offering highly accurate geometric data which is easier to process compared to radar data it is of certain interest for everybody who works with morphologic ground pattern on a wide range of scales.

In aerial archaeology this technique opens new opportunities since until now this discipline was dominated by visual aerial photograph interpretation and within that mainly looking at crop marks. By calculating digital terrain models from the Lidar raw data points it is possible to detect morphological shapes of the ground that are hardly or not possible to see with any other technique. Examples have shown that even with ground survey it is often impossible to detect features that are of low relief but extend over a large area.

Another, if not the most important advantage of Lidar, is that in most of all cases it is possible to get good information from the ground even below forest vegetation. In comparison to aerial photographs this offers the advantage to prospect large forested areas.

Information from Lidar data can be extracted either directly from the raw data points or from derived products like digital terrain models (DTM) and digital surface models (DSM) respectively. The latter doesn't play an important role in archaeology as they mostly represent the surface of the vegetation or recent artificial buildings. Working with the raw data points is mainly restricted to automated object detection and object modeling, while DTMs are well suited for visual interpretation and automated object detection as well.

The calculation of a DTM roughly works by filtering the last reflections of all laser beams and to interpolate a 3D surface. In detail there are plenty of methods to do that and of which each leads to different results. To get the best possible models it is therefore necessary to decide which method is best for a certain purpose or terrain. The software package TreesVis is demonstrated in this context. It is continuously developed at the Department for Remote Sensing and Landscape Information Systems (FeLis) at the University of Freiburg, Germany. Within that software a powerful tool for DTM and DSM generation is implemented and offers a variety of methods to calculate these models.

The visualization of a DTM can either be in two dimensions as a grayscale image or in three dimensions within a 3D viewer. Most common graphic programs only support the 2D raster mode where the height is visualized as a gray value. Even if this display mode is widely used it is not the best way to interpret three dimensional features. Further a limitation of the visible information occurs by displaying only 256 height values on the screen and not the full possible range. Here the TreesVis software offers a 3D viewer that visualizes all information simultaneously in realtime. If necessary, terrain and surface models can be visualized together with the raw data points and can additionally be overlaid with orthophotos. By virtually flying through the models without any display delay especially for the visual interpretation it is possible to extract much more details as the height is now not limited to 256 values anymore.

Besides the visual interpretation of Lidar or deduced data in several cases an automated object detection is a helpful and time saving option. Also features can be detected which are visually difficult to see. An example for a possible archaeological usage of this technique, are linear structures occurring widespread within a large area. Instead of manual digitization algorithms for automatic object detection increase the accuracy and do the same job within seconds.

The example for those linear structure detection demonstrated here comes from a forestry application for the delineation of forest roads. The program builds up onto a line following algorithm which works on slope gradient images. In fact the main concepts are directly transferable to archaeological pattern like the Gallo-Roman structures found in the vicinity of Nancy, France.

Of course, due to the multiple knowledge of different interrelations, that are essential to interpret archaeological structures it will always be necessary to undertake further examinations of the automated results. There are not only technically manageable features which influence those classifications. But these circumstances should not discourage from using these techniques to improve the information extraction from Lidar data that is potentially available. A close collaboration of remote sensing and image processing experts together with archaeologists would therefore be of important advantage for both sides. Remote sensing could gain from the archaeological expert knowledge and otherwise archaeology would get an advanced technical input from remote sensing.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE LA JOURNEE:

Lors de cette journée de travaux, de nombreux thèmes ont été évoqués, soit pendant les présentations, soit lors des questions qui les ont suivi : en voici une liste non exhaustive :

- Les coûts : ils varient selon la surface couverte et la densité de points demandés. La technique reste couteuse et il serait intéressant de tenter de quantifier la plus-value réelle apportée par de fortes densités, au regard notamment des résultats obtenus grâce aux levés allemand (1,5 pts/m²).
- Les logiciels utilisés : dans les cas évoqués lors de cette journée, les données ont été traitées sous Arc View, Surfer, TreesVis et Grass. Une réflexion sur les outils et leurs spécificités dans le traitement des images pourrait être intéressante, notamment dans le développement d'outil spécifique à telle ou telle problématique.
- Les modes d'exploitation des données : plusieurs types de traitements de données ont été utilisés par les projets présentés : Ombrage, représentations en isolignes, cartes de densité, profils en coupes, 3D. Chacun de ces modes d'exploitation permet de mettre en lumière tel ou tel aspect d'un site, d'une topographie ou d'un milieu : peut-être un travail d'identification des apports de chacun de ces traitements permettrait-il aux archéologues de mieux cibler la méthode à choisir en fonction de la problématique qu'ils souhaitent développer ?
- La vectorisation des données : plusieurs réflexions ont permis de faire avancer cette problématique technique, notamment que : le TIN demeure plus précis pour la création de courbes de niveaux, que pour une digitalisation d'objet en lumière, il vaut mieux partir des courbes de niveau que de l'ombrage du MNT, et que pour la détection automatique de lignes de rupture, les images de gradient demeurent une solution inefficace. Comme nous l'avons constaté avec les modes d'exploitation des données, cette thématique mériterait un travail commun de la part des utilisateurs de la technique en archéologie afin de produire des protocoles techniques pour chaque piste explorée.
- La 3D : Cet outil, extrêmement spectaculaire, comme nous avons pu le vérifier lors de la présentation de Johannes Heinzl, semble parfois plus efficace que les ombrages lorsque l'on cherche à remettre en contexte les anomalies topographiques. Toutefois, à l'heure actuelle, elle ne peut être appliquée que sur des dalles relativement restreintes, au vu du nombre de points que les logiciels doivent traiter. De la même manière, une réflexion sur les cadres d'utilisation et les apports pour la connaissance archéologique de ce traitement des données serait intéressante à développer.
- La communication des outils et des résultats au grand public (et aux collègues) par la vulgarisation du discours scientifique.

Ces différentes pistes, explorées le 6 février, invitent à des réflexions communes, voire à une vraie logique de travail méthodologique et technique en réseau de la part des archéologues. En effet, il convient maintenant d'expérimenter l'étendue des possibilités offertes par cette technique, que nous commençons seulement à explorer.

Le souhait a donc été émis lors de cette journée, de la mise en place d'une dynamique de réflexions communes, afin d'alimenter les problématiques et résoudre les blocages techniques parfois rencontrés.

Par ailleurs, dans le cadre de la recherche de nouveaux financements, une interaction plus forte avec d'autres institutions utilisatrices de la technique pourraient permettre de disposer de nouvelles données.

C'est sur ces propositions que nous avons clos la journée du 6 février 2008.

